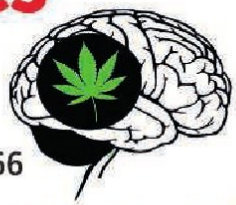
CANNABIS et CERVEAU

Les nouvelles études mondiales

p.66



SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

© SCHROEDER/BERKELEY LAB-ESA - SHUTTERSTOCK

ÉNERGIE NOIRE

La force qui déchire l'Univers

p.26

MARS 2024 - N° 925 - ALLEMAGNE 7,40 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / PORTUGAL 5,70 € / DOM 5,90 € / TOM 8100 XPF / ILE MAURICE : 8,80€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

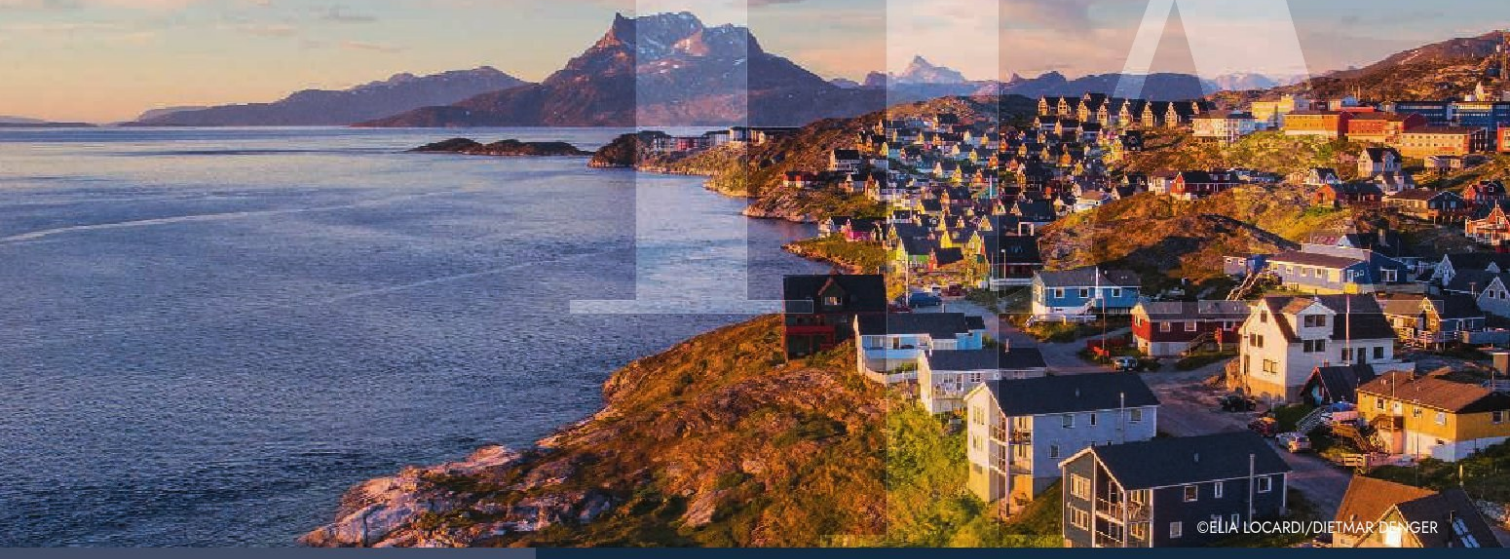
L 13418 - 925 S - F: 5,30 € - RD

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 925 - MARS - ENERGIE NOIRE

OFFRE EXCLUSIVE

Et si vous trouviez le ciel le plus bleu au Groenland?

Et si vos vols étaient offerts?



Croisières au Groenland avec vols offerts

À PARTIR DE

7900€ TTC

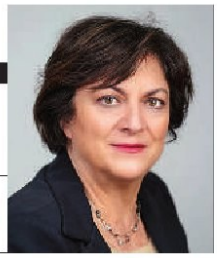
Depuis 1896, nous sommes les pionniers de l'exploration. Réservez votre croisière d'expédition avant le 31 mars et nous vous offrons les vols internationaux sur une sélection de départs. Vivez une expérience unique à bord de navires confortables et parfaitement adaptés à nos destinations d'exception.

Tél: 01 86 26 04 19

hxexpeditions.com/fr ou dans votre agence de voyages

Offre soumise à conditions, non rétroactive, valable pour toute nouvelle réservation simultanée d'une croisière d'expédition et d'un forfait acheminement aérien du 28.12.23 au 31.03.24. La réduction « Vols offerts » s'applique sur le prix du forfait acheminement aérien vendu séparément de la croisière et uniquement sur les vols en classe économique au départ de Paris (en fonction des disponibilités). Ne s'applique pas sur les vols inclus dans l'itinéraire de la croisière. Cette offre est valable sur une sélection de départs et un nombre limité de cabines. Le prix de la croisière reste modulable et évolutif en fonction du remplissage du navire comme indiqué dans les conditions particulières de ventes. Non combinable avec les autres offres en cours (Réservation anticipée, tarif Groupes ou autre tarif spécifique) sauf la remise 1893 Ambassador. Hurtigruten France SAS au capital de 40 000 € - R.C.S Paris B 449 035 005 - IM 075100037 - APST RCAPST HISCOX/125 520.

En savoir plus


BERNARD MARTINEZ

Dominique Leglu
Directrice éditoriale

Penser par soi-même

« *Ce n'est pas nier l'importance de l'économie et de l'innovation que de rappeler qu'il ne peut y avoir d'innovation sans invention, cette capacité à inventer étant incompatible avec une science à la chaîne.* » Pour le neurobiologiste et professeur au Collège de France Alain Prochiantz, l'occasion était belle d'entrer en résonance avec la pensée du philosophe Dominique Lecourt, disparu il y a deux ans, lors de l'hommage qui lui a été rendu début février à l'université Paris Cité. Pensée nécessaire, à l'heure où s'accélèrent les interrogations autour de l'intelligence artificielle, de la bombe atomique — et pas seulement au cinéma avec *Oppenheimer* —, de l'augmentation de l'humain par des puces dans le cerveau…

Repousser les frontières du connu. L'importance de la « pensée scientifique », rappelée durant le colloque organisé par Céline Lefève et Claude-Olivier Doron, du centre Canguilhem? Pour la mesurer, il faut (re)lire l'essai *Contre la peur* du philosophe, qui permet en particulier de saisir le risque de ne pas connaître la différence entre recherche fondamentale et recherche finalisée. Quand la première *« s'applique à repousser toujours les frontières du connu* [et n'a] *d'autre fin que son propre progrès »*, la seconde n'est *« rationnelle* [que] *par rapport à une fin »*. Deux rationalités à distinguer.

Pensée technologique. La science, pour inventer, nécessite hardiesse et énergie. Des *« coups d'audace "*férocement spéculatifs*", selon le mot d'Einstein »* cité par Dominique Lecourt. Et, à ne pas distinguer le fondamental de l'appliqué, on se priverait encore d'autre chose, comprendre *« le régime propre de la pensée technologique »*. Car il faut faire preuve de beaucoup d'ingéniosité, ce qui prend du temps (et de l'argent), pour transformer les connaissances, prendre des brevets, élaborer des produits. À preuve, se sont écoulées plusieurs décennies entre la découverte de l'ARN et le développement des vaccins y faisant appel, non seulement contre le Covid-19, mais bientôt contre d'autres maladies infectieuses et certains cancers.

Super-intelligence. Quant à l'IA, dont les débuts remontent aux années 1950, il aura fallu attendre des calculateurs ultrapuissants, avec leurs processeurs GPU capables d'ingurgiter des trillions de données, pour la voir finalement surgir dans le domaine public avec ChatGPT. On peut se demander qui, de la peur de l'IA ou de la fascination pour une super-intelligence, finira par l'emporter? En espérant qu'au mieux, ce ne soit ni l'une ni l'autre… Histoire de ne verser ni dans l'anti-science ni dans le scientisme, cette « religion de la science ».

Animaux privés de raison. Dominique Lecourt aimait à citer Pic de la Mirandole et son éthique selon laquelle *« il nous appartient, puisque notre condition native nous permet d'être ce que nous voulons, de veiller par-dessus tout à ce qu'on ne nous accuse pas d'avoir ignoré notre haute charge pour devenir semblables aux bêtes de somme et aux animaux privés de raison »*. Obligation semble s'imposer ici, cher lecteur, chère lectrice de *Sciences et Avenir*, de penser par soi-même. ■

COURRIER

« Des cellules cérébrales d'un nouveau type »
(*Sciences et Avenir–La Recherche* n° 921, novembre 2023)

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

À propos de cellules cérébrales, dans votre n° 921 p. 22, vous dites que le cerveau est composé de 40 % de neurones et 60 % de cellules gliales. Or dans le n° 798 d'août 2013 p. 59, vous parlez de 10 % de neurones et 90 % de cellules gliales. J'aimerais que vous m'expliquiez pourquoi ce changement.

Jacques Roux

S. et A. : Dans l'article de 2013 que vous citez, l'auteur relayait en effet — au conditionnel — l'hypothèse formulée alors par Eric Kandel selon laquelle les cellules gliales pourraient représenter les neuf dixièmes de l'ensemble des cellules cérébrales. En réalité, le comptage de ce côté obscur de notre cerveau — les cellules gliales ne « s'illuminent » pas comme les neurones qui véhiculent un courant électrique — était alors assez balbutiant. Aujourd'hui encore, au regard des quelque 200 milliards de cellules qui constituent le cerveau, il est difficile d'être précis. Mais il existe un consensus sur la répartition citée dans notre dernier article : environ 60 % de cellules gliales (astrocytes, microglie) pour 40 % de neurones.

Mutation génétique

Dans votre article « Quand l'humanité a failli disparaître » (*S. et A.* n° 922), vous rappeliez que nos ancêtres avaient 24 paires de chromosomes mais que *« deux ont fusionné pour donner naissance à notre chromosome 2 »*, de sorte que nous en avons aujourd'hui 23 paires. Quand cette mutation s'est produite, les individus à 24 et 23 chromosomes étaient-ils interféconds ? En termes de sélection, cette mutation représentait-elle un avantage pour finir par s'imposer ?

Hugo Pérez Bercoff

S. et A. : Cette question soulève des problématiques sur la spéciation, le moment où se forme une nouvelle espèce. La biologie a longtemps enseigné que les hybrides, animaux résultant de la rencontre de deux espèces, étaient infertiles. Les données plus récentes tendent à montrer que la situation est plus nuancée. Il s'agit de processus progressifs, avec des brassages encore possibles avec la population en cours de spéciation. Mais le succès reproductif devait être meilleur avec deux parents portant le même nombre de chromosomes… On peut penser que ce réarrangement chromosomique a entraîné un avantage sélectif car il a, en effet, donné naissance à la lignée humaine. De quelle nature ? Nous ne pensons pas que les scientifiques l'aient déjà établi.

Qui dort dîne

Dans votre article sur « Les bienfaits d'un long jeûne nocturne » (*S. et A.* n° 924), vous écrivez qu'il est préférable de petit-déjeuner à 8 heures plutôt qu'à 9 heures, et de dîner avant 21 heures… Mais peu importe l'heure du repas : l'essentiel est de jeûner le plus longtemps possible, il me semble…

Elise Esquerre

S. et A. : Effectivement, il peut sembler étonnant que déjeuner tôt soit aussi important que la durée du jeûne nocturne. C'est pourtant ce qu'a confirmé le chercheur. Attention, toutefois, ce n'est qu'une association statistique et cela ne concerne que le risque de certains troubles cardio-vasculaires.

Précision

Dans l'article sur la pêche durable (*S. et A.* n° 923, p. 58), il fallait lire que *« les 90 kg d'hydrogène utilisés pendant la saison de pêche ont bien permis d'éviter la combustion de 500 litres de gazole, épargnant ainsi 1,75 tonne de CO_2 »* et non 75 tonnes.

La science, CQFD.
Natacha Triou
DU LUNDI AU JEUDI
16H – 17H
> Disponible sur le site et l'appli Radio France.

© Paolo Pesce / Ch. Abramowitz

En partenariat avec
SCIENCES ET AVENIR La Recherche

france culture
L'esprit d'ouverture

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

L'histoire en marche

Voilà un peu plus d'un quart de siècle que notre connaissance de la nature de l'Univers a radicalement changé. Le constat, fait à la fin des années 1990, que son expansion ne ralentit pas comme on le pensait mais au contraire accélère, impliquait l'existence d'une mystérieuse énergie, moteur de cette accélération. Ignorant tout de sa nature, les chercheurs l'ont nommée énergie noire (ou sombre, traduction littérale de *« dark »*, la dénomination anglo-saxonne). Si l'on y ajoute la matière noire, nécessaire à l'explication du mouvement des galaxies tel qu'on l'observe, et dont on ne connaît pas plus la nature, cela fait rien de moins que 95 % de la composition de l'Univers qui nous échappent totalement. *« Scientifiquement embarrassant »*, convient Giuseppe Racca, de l'Agence spatiale européenne *(p. 32)*. Les cosmologistes sont arrivés à forger quatre hypothèses sur la nature de l'énergie noire *(p. 28)*. Et aujourd'hui, nous sommes peut-être à l'aube de savoir si l'une d'elles est la bonne, car trois instruments spécifiquement conçus pour l'étudier s'apprêtent à livrer leurs premiers résultats. Dans la communauté scientifique, l'excitation est à son comble. *« Notre discipline vit une époque formidable! »*, s'enthousiasme la cosmologiste Nathalie Palanque-Delabrouille *(p. 37)*.

> « Nous sommes peut-être à l'aube de savoir si l'une des hypothèses sur la nature de l'énergie noire est la bonne »

L'histoire s'écrit sous nos yeux. À propos d'histoire des sciences, nous sommes très heureux de vous proposer un nouveau rendez-vous : trois pages y seront désormais consacrées tous les mois. Parce que, plus que jamais, nous avons besoin de comprendre le passé pour préparer le futur. Or, cette compréhension ne cesse d'évoluer avec le travail des historiens. C'est donc directement vers eux que nous nous sommes tournés. Chaque mois, un nouvel auteur apportera un éclairage inédit sur une découverte, un personnage, un événement. Nous commençons avec l'avènement des travaux menés pour déterminer l'âge de la Terre. Le mois prochain, nous évoquerons Robert Oppenheimer, le physicien éclipsé par la Bombe. Bonne lecture et n'hésitez pas à nous faire part de vos remarques. ■

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANNOS (fondamental) - 01.55.35.56.78 Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33 Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23 Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27 Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, CLAIRE MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, S. BRIET, N. GUTIERREZ C., P. KALDY, J.-F. LAGROT, C. LAURENS, E. NICOLAS, A. VERNET, S. VIONNET
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Sarah BOULVARD (Journaliste vidéaste en alternance) - 01.55.35.56.51, Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Jessica RIOS responsable projets digitaux - Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et évènements – Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org

FR

ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte une lettre de « bienvenue aux abonnés » et un encart « Sophia Boutique - Montre Chronographe Vuillemin Regnier », jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés ; ainsi qu'un message « Paris Match » et un encart « Société Française des Monnaies » jetés sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0625 K 79712.
ISSN 00368636. Distribué par MLP.

Le cocon familial a maintenant des roues.

Nouveau Tiguan.

Avec assistant de conduite Travel Assist.*

Les belles histoires commencent ensemble.

A
B
C
D 152 g CO_2/km
E
F
G

Modèle présenté : Nouveau Tiguan finition R-Line, TDI 150 DSG, certains équipements présentés peuvent être en option. * Les technologies d'aide à la conduite ne dispensent pas le conducteur d'être vigilant.

Cycles mixtes de la gamme Tiguan R-line TDI 150 DSG (l/100 km) WLTP : 5,6-6,0. Rejets de CO_2 (g/km) WLTP : 145-152. Valeurs au 02/01/2024, susceptibles d'évolution. Plus d'informations auprès de votre Partenaire.

Depuis le 1er septembre 2018, les véhicules légers neufs sont réceptionnés en Europe sur la base de la procédure d'essai harmonisée pour les véhicules légers (WLTP), procédure d'essai permettant de mesurer la consommation de carburant et les émissions de CO_2, plus réaliste que la procédure NEDC précédemment utilisée.

Volkswagen Group France – SAS au capital de 198 502 510 € – 11, av. de Boursonne, Villers-Cotterêts RCS Soissons 832 277 370.

Pensez à covoiturer #SeDéplacerMoinsPolluer

SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche / N° 925 / Mars 2024

DOSSIER P. 26

Énergie noire

La force qui déchire l'Univers

La communauté scientifique se passionne pour cette mystérieuse force qui contrecarre la gravitation. Trois nouveaux instruments d'observation bientôt opérationnels devraient fournir des données essentielles sur la nature de l'énergie noire.

P. 52

Éolien en mer : l'aube des géants flottants

L'État a lancé un appel d'offres pour la concession de trois parcs éoliens « offshore » au large de nos côtes. Revue des solutions techniques proposées par les sociétés candidates.

P. 66

Cannabis : ses véritables effets sur le cerveau

Les effets toxiques du THC sur l'activité cérébrale sont désormais bien documentés grâce au recul offert par la légalisation dans certains États. Les adolescents sont particulièrement vulnérables.

P. 78

Gaza, le patrimoine anéanti

Depuis octobre dernier, le riche patrimoine culturel et archéologique du territoire palestinien disparaît sous les bombardements israéliens. Des archéologues témoignent.

3 **Éditorial** par Dominique Leglu
4 **Courrier**
5 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

8 **ACTUALITÉS** Le Japon ouvre la voie à des alunissages de haute précision / L'IA bouleverse l'analyse d'empreintes
40 **Maison Poincaré : les mathématiques en partage**
46 **La course automobile face au virage vert**
50 **Journal de l'IA : la délicate collaboration humain-machine**

NATURE

12 **ACTUALITÉS** Des champignons de mer aiment le plastique / Au Kenya, de petites fourmis font plier les grands lions
52 **Éolien en mer : l'aube des géants flottants**
58 **La révolution du lait de chamelle**

SANTÉ

16 **ACTUALITÉS** Comment le stress détraque les intestins / Un test sanguin efficace pour le diagnostic d'Alzheimer
66 **Cannabis : ses véritables effets sur le cerveau**
72 **Comment en finir avec la toux chronique**
76 **Nutrition : faut-il se laisser tenter par la cuisine coréenne ?**

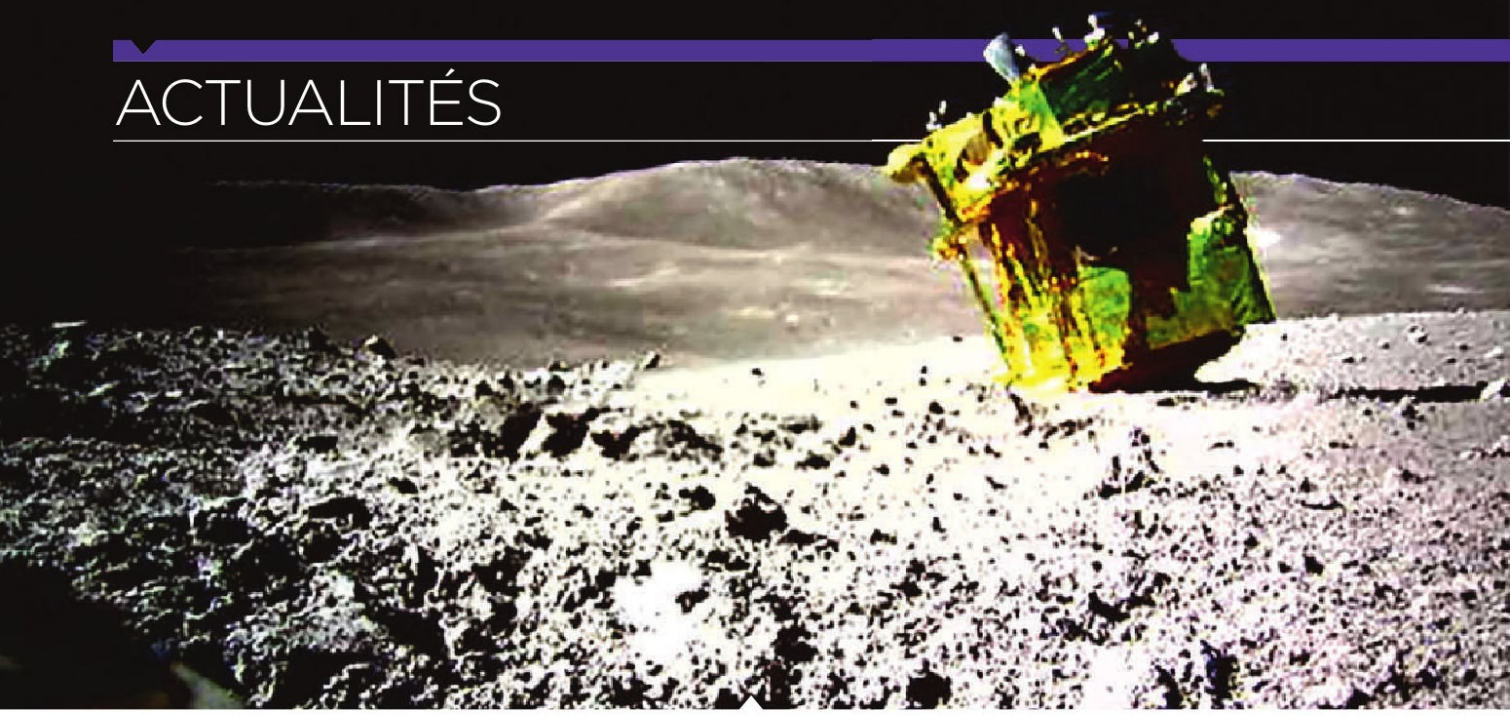
HISTOIRE

20 **ACTUALITÉS** La disparition du géant herbivore élucidée / Le dolmen de Menga, prouesse du néolithique
78 **Gaza, le patrimoine anéanti**
83 **Les poux réécrivent l'histoire de l'humanité**
86 **Histoire des sciences : la Terre prend de l'âge**

TRANSVERSALES

90 **Sélection livres**
93 **Expositions**
94 **Chroniques**
Climat par Céline Guivarch et Christophe Cassou / Mathématiques par Sylvie Benzoni-Gavage / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar
96 **Questions de lecteurs**
97 **Le ciel de mars**
98 **Jeux**

MARK GARLICK/ SPL/ SUCRÉ SALÉ - V. JONCHERAY/ANDIA.FR - VOISIN/PHANIE - AFP



L'atterrisseur Slim photographié le 19 janvier, peu après son alunissage la tête en bas, par le mini-rover LEV-2 de la mission japonaise.

Le Japon ouvre la voie à des alunissages de haute précision

La sonde Slim s'est posée sur le sol sélène à moins de 100 mètres de l'endroit visé, contre plusieurs kilomètres pour les missions précédentes.

La troisième tentative aura été la bonne. Après deux échecs en 2022 et 2023, le Japon a réussi un atterrissage en douceur sur la Lune. Lancée en septembre dernier, la sonde Slim (Smart Lander for Investigating Moon) s'est posée le 19 janvier dans le cratère Shioli — à quelque 300 km de la mer de la Tranquillité, site d'alunissage des astronautes d'Apollo 11 en 1969. Le Japon devient ainsi la 5e nation à réussir cet exploit, après l'ex-URSS, les États-Unis, la Chine et, plus récemment, l'Inde (*lire* S. et A. *n° 920, octobre 2023*). Mais la mission surnommée « Moon Sniper »restera aussi dans les annales pour une autre raison. Son objectif principal, en effet, était de tester une technique d'alunissage de très haute précision : à moins de 100 mètres de l'endroit visé, contre plusieurs kilomètres pour les missions précédentes. Or l'engin de 200 kg a pu se poser à 55 m de sa cible ! *« Pour y parvenir, un calculateur de bord ultrarapide a comparé des images de la surface de la Lune prises par des orbiteurs avec celles captées en temps réel par la sonde, les cratères lunaires servant de repères »*, explique Francis Rocard, responsable des programmes d'exploration du Système solaire au Centre national d'études spatiales (Cnes). Cette technique de navigation autonome va être à terme très précieuse. Dans le cadre du programme Artemis de la Nasa, elle pourrait permettre en effet *« de déposer du matériel et des capsules habitées à des endroits de plus en plus proches les uns des autres »*, avance l'astrophysicien. Des sites d'une grande importance scientifique, mais exigus, deviendront par ailleurs plus accessibles.

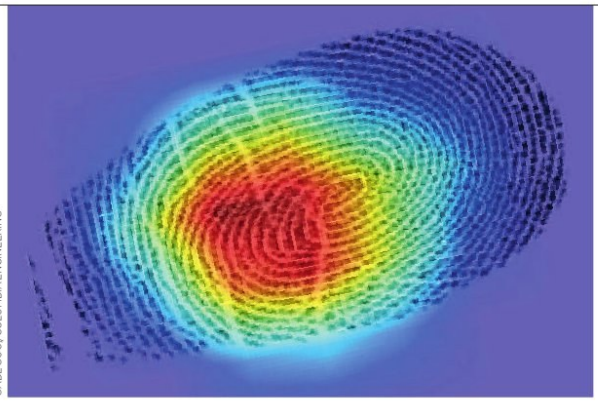
Des données précieuses sur la géologie lunaire

La mission nippone ne s'est toutefois pas déroulée sans encombre. En raison d'une anomalie survenue lors des dernières dizaines de mètres de sa descente, Slim a fini sa course la tête quasiment à l'envers. *« Au dernier moment, l'un des moteurs devait provoquer le pivotement de l'atterrisseur de 90 degrés,* précise Francis Rocard. *Mais il a tourné de 180 degrés, se retrouvant au final vers le haut.* » La vitesse verticale était heureusement très faible (moins de 5 km/h), évitant à Slim un crash fatal. Avant d'alunir, la sonde a même largué deux petits robots (LEV-1 et LEV-2) qui ont pu transmettre à la Terre une photo de Slim les quatre fers en l'air. Mal positionnés, les panneaux solaires de la sonde n'ont pu la faire fonctionner que deux jours au lieu d'une quinzaine prévue. Un délai suffisant pour que l'atterrisseur prenne des dizaines de clichés des terrains alentour et fournisse ainsi de précieuses informations sur la géologie de la Lune. L'équipe japonaise devait tenter toutefois de rallumer la sonde après la nuit lunaire. ■ **F. D.**

JAXA/TAKARA TOMY/SONY GROUP CORPORATION/DOSHISHA UNIVERSITY/THOMAS APPÉRÉ

L'IA bouleverse l'analyse d'empreintes

Des similitudes existent entre les différents doigts d'une même personne.



GABE GUO/COLUMBIA ENGINEERING

L'algorithme s'appuie sur les motifs de la partie centrale de la pulpe du doigt.

C'est l'étonnante découverte faite grâce à une intelligence artificielle (IA) développée par une équipe de l'université Columbia (États-Unis). Elle jette un pavé dans la mare de la communauté médico-légale qui s'accordait sur le fait que les différentes empreintes d'une même personne étaient incomparables. Contre toute attente, le modèle décrit dans la revue *Sciences Advances* a en effet trouvé des correspondances. Car là où la méthode classique d'identification se base sur les croisements et extrémités des crevasses formant le motif sur le bout de nos doigts, l'IA a examiné la courbure et l'angle de ces lignes et, plus précisément, la partie centrale du motif. De sorte que près de 77 % des paires d'empreintes d'une même personne ont été identifiées comme telles. Reste à voir comment les experts médico-légaux se saisiront de ce fait nouveau pour leurs enquêtes. **S. V.**

EN DEUX MOTS

PREMIÈRE Trois grottes de 20 à 47 m de profondeur ont été décelées sur la comète Tchourioumov-Guérassimenko, photographiée par la sonde européenne Rosetta en 2014. **MISSION** Premier engin volant sur une autre planète, l'hélicoptère Ingenuity (Nasa) s'est cassé deux pales et a dû cesser ses activités après trois ans sur Mars. **EXOPLANÈTE** À 73 années-lumière, dans la constellation de la Grande Ourse, des astronomes ont découvert une planète de la taille de la Terre plus proche et plus jeune que tout autre monde jamais identifié.

XUBING.IE / XINHUA / AFP

Entrée du complexe destiné à traquer la matière noire.

Record pour un laboratoire souterrain

PHYSIQUE Le laboratoire souterrain le plus profond et le plus vaste au monde a été inauguré dans le sud-ouest de la Chine. Le CJPL-II (China Jinping Underground Laboratory) offre un volume de 330 000 m³ à -2400 m sous les montagnes Jinping. Il servira à traquer la matière noire — hypothétique substance qui constituerait 27 % de l'Univers mais n'interagit que très peu avec la matière ordinaire *(lire p. 26)*. Les signaux, ténus, seraient ainsi plus facilement détectables à très grande profondeur, avec un minimum de bruits de fond. **F. D.**

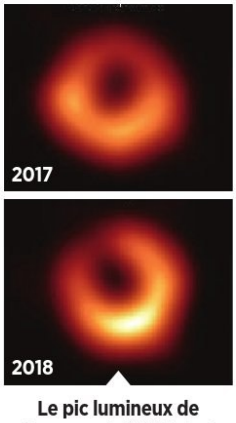
Le nœud moléculaire le plus serré au monde

CHIMIE C'est par hasard qu'une équipe qui voulait entrelacer deux molécules circulaires a synthétisé le « nœud de trèfle », le plus petit jamais répertorié. Il ne possède que 54 atomes (d'or, de phosphore, de carbone et d'hydrogène), soit 15 de moins que le précédent record. Cet heureux auto-assemblage pourrait permettre de mieux comprendre comment les protéines et macromolécules d'ADN forment des nœuds et s'enchevêtrent. **F. D.**

SOURCE : LI-LONG DANG, UNIVERSITÉ FUDAN, CHINE.

Une nouvelle image du trou noir de la galaxie M87

ASTROPHYSIQUE La collaboration Event Horizon Telescope a dévoilé une nouvelle image de M87*, le trou noir supermassif situé au cœur de la galaxie éponyme. Elle montre l'astre situé à 800 millions d'années-lumière un an après l'image révélée en avril 2019 à partir de données de 2017 — c'était alors la première photo d'un trou noir. Cette nouvelle image repose, elle, sur des données de 2018. La taille de l'anneau n'a pas changé, comme le prédit la relativité générale. Mais le pic d'émission s'est déplacé de 30°, traduisant le chaos qui agite la matière sur le point d'être avalée par le trou noir. **F. N.**



EHT COLLABORATION

Le pic lumineux de l'anneau de M87* s'est décalé de 30° en un an.

Des minirobots pollinisateurs

ROBOTIQUE Longs respectivement de 8,5 et de 22 mm, le MiniBug et le WaterStrider *(photo ci-dessous)* prennent pour modèles des insectes. Sans moteur ni batterie, ils se déplacent grâce à un actionneur fait d'un alliage à mémoire de forme, le nitinol. L'élément se contracte sous l'action d'un courant électrique, puis revient à sa position initiale quand le courant est coupé. De tels robots pourraient servir à de la pollinisation artificielle ou à la surveillance d'un environnement. **A. D.**

SOURCE : C. TRYGSTAD, UNIV. D'ÉTAT DE WASHINGTON, ÉTATS-UNIS.

BOB HUBNER, WSU PHOTO SERVICES

GARRY TICE/LOCKHEED MARTIN

L'avion X-59, un supersonique silencieux

INGÉNIERIE La Nasa et l'entreprise américaine Lockheed Martin ont dévoilé le X-59 Quesst (Quiet SuperSonic Technology), un avion supersonique expérimental qui doit effectuer ses essais en vol cette année. Il s'agit d'évaluer l'acceptabilité de ce type de vol, aujourd'hui interdit en raison du bang supersonique. Pour le réduire à 75 décibels, le X-59 est doté d'un long nez de 11,5 mètres sur les 30,4 mètres de long du fuselage et d'un cockpit sans relief, le pilotage se faisant à l'aide d'écrans. **S. R.**

Pas de salade pour les astronautes

ESPACE Alors que les passagers de la Station spatiale internationale peuvent occasionnellement grignoter un peu de salade verte cultivée à bord, une étude met en garde : en microgravité, celle-ci est plus sujette à se trouver contaminée par des bactéries pathogènes. En particulier les salmonelles à l'origine d'infections parfois sévères. **H. J.**

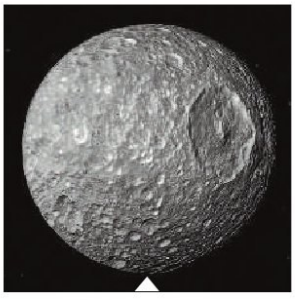
SOURCE : NOAH TOTSLINE, UNIVERSITÉ DU DELAWARE, ÉTATS-UNIS.

En microgravité, les plantes sont plus sujettes aux infections bactériennes.

Un nouvel océan dans le Système solaire

Mimas, petit satellite de Saturne, posséderait un océan enfoui sous une couche de glace.

S'il était hypothétique, le voici confirmé. Mimas, petit satellite de Saturne aux allures d'étoile de la mort du film *Star Wars*, possède bel et bien un océan enfoui sous une couche de 20 à 30 km de glace, selon une étude publiée dans *Nature*. La certitude des astronomes se fonde sur l'observation des caractéristiques orbitales de la lune de 400 km de diamètre, en l'occurrence le mouvement de rotation de l'ensemble de l'orbite autour de la planète. Grâce à l'analyse des données enregistrées par la sonde Cassini entre 2004 et 2017, les chercheurs ont pu établir que cette vitesse révélait la présence d'un océan, et non d'un noyau de forme allongée entouré d'une couche de glace, l'autre hypothèse pour décrire l'intérieur de Mimas. Le satellite devient ainsi le cinquième du Système solaire, avec Europe et Ganymède (autour de Jupiter), Encelade et Titan (Saturne) à avoir un océan interne, peut-être propice à l'apparition de la vie. **F. N.**



NASA/JPL/SSI/SWRI

La petite lune de 400 km de diamètre abriterait un océan 20 à 30 km sous sa surface cabossée.

Une galaxie sans étoiles découverte par hasard

ASTROPHYSIQUE C'est probablement la galaxie la plus sombre observée. À 270 millions d'années-lumière, J0613+52 n'est qu'un amas de gaz d'hydrogène d'une masse équivalent à la moitié de notre Voie lactée. Les nuits y sont sans étoiles, ou presque, sans doute à cause de son isolement relatif : elle ne subit pas l'influence gravitationnelle de voisines pouvant provoquer l'effondrement du gaz en étoiles. Le fait qu'elle ait été découverte par hasard suggère que ce genre de galaxie noire est sans doute assez courant dans l'Univers, mais très difficile à observer. **F. N.**

SOURCE : WIM VAN DRIEL, OBSERVATOIRE DE PARIS, FRANCE.

UNIVERSITY OF DELAWARE

PHILIPPE A LES PIEDS SUR TERRE

AVEC SON ASSURANCE VIE, IL A PRÉPARÉ SA SUCCESSION POUR QU'ELLE SOIT MOINS COÛTEUSE POUR SES PROCHES.

› Aucun droit de succession sur les primes versées avant 70 ans*.

Retrouvez plus d'informations en agence ou sur **harmonie-mutuelle.fr**

Harmonie mutuelle

GROUPE VYV

AVANÇONS collectif

MUTUALITÉ FRANÇAISE
MEMBRE DE LA

*Exonération à hauteur de 152 500 euros par bénéficiaire. Les montants investis sur des supports en unités de compte sont soumis à des fluctuations à la hausse ou à la baisse suivant l'évolution des marchés financiers et présentent un risque de perte en capital. Ce risque financier est assumé par l'adhérent. Harmonie Mutuelle (distributeur) - Mutuelle soumise aux dispositions du livre II du Code de la mutualité, immatriculée au répertoire Sirène sous le numéro Siren 538 518 473. Numéro LEI 969500JLU5ZH89G4TD57. Siège social : 143, rue Blomet - 75015 Paris. MAIF VIE (assureur Épargne Vie Simplicité) - Société anonyme au capital de 122 000 000 € - RCS Niort 330 432 782 - 50, avenue Salvador-Allende - CS 90000 - 79029 Niort Cedex 9. Entreprise régie par le Code des assurances. Mutex (assureur Epargne Vie Expertise) - Société anonyme au capital de 37 302 300 €. Entreprise régie par le Code des assurances - RCS Nanterre 529 219 040 - 140, avenue de la République - CS 30007 - 92327 Châtillon Cedex. Crédit photo : Getty Images - BABEL

PAZET AL.

1947 espèces de champignons marins ont été répertoriées dans le monde à ce jour.

Des champignons de mer aiment le plastique

Les chercheurs doivent vérifier si leur capacité à dégrader les microplastiques constatée en laboratoire se déroule aussi en milieu marin.

Des champignons marins pourraient détruire les microplastiques ! C'est la découverte surprenante faite par un océanographe de l'université de Vienne (Autriche), Federico Baltar. À partir de prélèvements d'échantillons d'eau de mer de l'Espagne à la Patagonie et du Groenland à l'Antarctique, ce chercheur s'est focalisé sur ces espèces fongiques vivant en compagnie de bactéries, de microalgues, de zoo- et phytoplanctons à la surface des océans. Ces champignons pélagiques représenteraient 300 millions de tonnes sur les 6 milliards de l'ensemble des micro-organismes vivant dans cet écosystème.

Federico Baltar et son équipe ont essayé de déterminer si ces organismes étaient capables de digérer des éléments tels que les phtalates et les organophosphates, les plus enclins à être dégradés par des microbes, ainsi que l'ont démontré d'autres études. Avec en ligne de mire l'énorme enjeu écologique que représente la pollution des mers par les plastiques.

15 espèces plastivores parmi les 300 identifiées

Le séquençage génomique des échantillons prélevés a permis d'identifier 300 espèces. Parmi celles-ci, 15 se sont révélées aptes à dégrader les plastiques. « *Nous avons étudié leur génome pour comprendre leur potentiel métabolique qui permet de casser ces composés synthétiques,* raconte Federico Baltar dans le résumé publié par le Fonds autrichien pour la science, qui finance ces recherches. *Et nous avons déterminé les gènes qui servent à exprimer ces mécanismes et comment ceux-ci fonctionnent.* »

Les chercheurs veulent non seulement savoir ce qui rend les enzymes en cause efficaces pour dégrader les plastiques, mais également si ceux-ci sont les mêmes pour toutes les espèces. Il leur faudra enfin vérifier si cette capacité de dégradation des plastiques constatée en laboratoire se déroule bien dans le milieu naturel. Les premiers résultats sont annoncés pour la fin de l'année. ■ **L. C.**

ELLE A DIT

« Le chalutage de fond remet en suspension une partie du carbone piégé dans les sédiments du plancher océanique et est une source importante de pollution atmosphérique »

Trisha Atwood, de l'université d'État de l'Utah (États-Unis), dont l'étude montre que 55 % du carbone extrait des sédiments par ce mode de pêche rejoindront l'atmosphère en l'espace de sept à neuf ans.

ERIK FRANK/UNIVERSITÄT WÜRZBURG

Cette ouvrière pratique des soins à une congénère blessée.

Les fourmis guerrières soignent leurs infections

ENTOMOLOGIE Lorsqu'elles reviennent blessées de leurs raids contre les termites, les fourmis guerrières *Megaponera analis* sont triées par leurs congénères pour être soignées. Une étude montre que ces ouvrières peuvent identifier les plaies infectées et sécréter des agents antimicrobiens permettant de réduire la mortalité des blessées de 90 %. **H. J.**

SOURCE : ERIK FRANK, UNIVERSITÉ DE LAUSANNE, SUISSE.

Crédit photo : Getty Images/andresr.

Nos experts sont à vos côtés pour bien gérer vos placements

Chez Allianz, 1 100 conseillers experts en gestion de patrimoine sont à vos côtés partout en France pour vous accompagner et vous aider à préparer votre futur avec des solutions épargne, retraite et transmission adaptées.

Pour plus d'informations et prendre rendez-vous avec le conseiller le plus proche de chez vous, rendez-vous sur allianz.fr ou flashez ce QR Code.

Contacter un conseiller

Avec vous de A à Z

Allianz Vie - Entreprise régie par le Code des assurances - S.A. au capital de 681 879 255 € - 340 234 962 R.C.S. Nanterre. Siège social : 1, cours Michelet - CS 30051 - 92076 Paris La Défense Cedex. Document à caractère publicitaire.

Au Kenya, de petites fourmis font plier les grands lions

L'arrivée d'une espèce envahissante de fourmis influence le choix des proies que les lions vont chasser.

SYLVAIN CORDIER/BIOSPHOTO

L'attaque de buffles par des lions (ici en procédant par asphyxie, dans la réserve kenyanne du Masai Mara) est l'effet d'une réaction en chaîne.

Après trois ans de surveillance dans les prairies d'une réserve au Kenya, une équipe internationale démontre comment le quotidien du roi de la savane a été drastiquement modifié par la présence de minuscules fourmis à grosse tête (*Pheidole megacephala*). Depuis quinze ans en effet, cette espèce envahissante remplace peu à peu les fourmis *Crematogaster* qui tendaient, elles, à protéger les acacias du surpâturage par les éléphants en se faufilant dans leurs narines. Les scientifiques montrent que les éléphants dépouillent et renversent les arbres dépourvus de leurs protectrices jusqu'à sept fois plus rapidement que ceux colonisés par l'espèce envahissante. Ces paysages ainsi dénudés privent les lions des cachettes dont ils ont besoin pour chasser les zèbres, et les forcent à se tourner vers des proies plus dangereuses : les buffles, qui, eux, ne fuient pas. De 2003 à 2020, la proportion des équidés tués par des lions a ainsi chuté de 67 % à 42 %, tandis que celle de buffles tués est passée de 0 % à 42 %. **A.-S. T.**

VERA VASA ET AL.

À VOIR SUR LE NET

Une caméra voit le monde comme les animaux

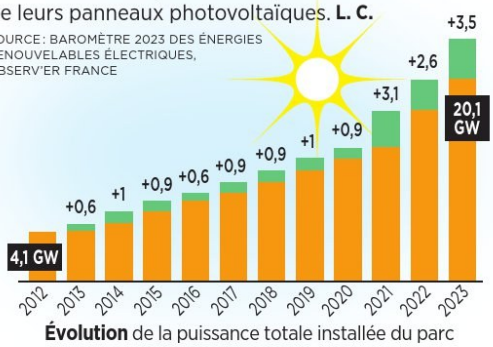
TECHNOLOGIE Une équipe a mis au point un nouveau système de caméra et un logiciel permettant de filmer les couleurs telles qu'elles sont perçues par les animaux dans leurs milieux naturels. L'outil enregistre simultanément dans quatre canaux de couleurs (bleu, vert, rouge et ultraviolet), traités ensuite en « unités perceptives » sur la base des connaissances existantes sur les photorécepteurs de chaque animal. **E. N.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Le solaire en France décolle enfin

ÉNERGIE Enedis, qui raccorde 90 % des installations d'énergies renouvelables, a enregistré 200 000 nouveaux producteurs en 2023, pour une augmentation de 4,2 gigawatts (GW) de puissance installée, dont 3,5 GW pour l'énergie solaire. Le million de producteurs devrait être dépassé en 2024. L'autoconsommation fait un bond remarquable, avec près de 500 000 particuliers qui utilisent l'électricité de leurs panneaux photovoltaïques. **L. C.**

SOURCE : BAROMÈTRE 2023 DES ÉNERGIES RENOUVELABLES ÉLECTRIQUES, OBSERV'ER FRANCE



Évolution de la puissance totale installée du parc photovoltaïque en France (en gigawatts).

BRUNO BOURGEOIS

Le séisme de 2011 au Japon a laissé une grande cicatrice

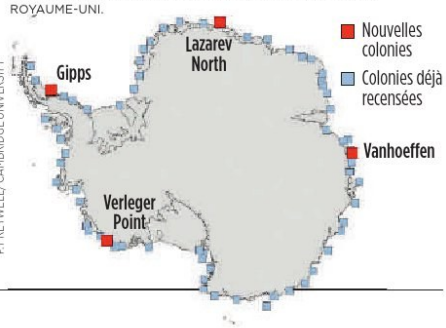
GÉOLOGIE Embarqués à bord d'un submersible par 7500 mètres de fond, des scientifiques ont découvert une nouvelle dorsale de 59 m de haut dans la fosse du Japon. Elle s'est formée à l'épicentre du séisme de Tohoku-oki de 2011 (de magnitude 9), à l'origine du tsunami ayant causé 18 000 morts. Une falaise de 26 m de haut s'élève à l'endroit où la faille a glissé de 80 à 100 m. **S. R.**

SOURCE : HAYATO UEDA, UNIVERSITÉ DE NIIGATA, JAPON.

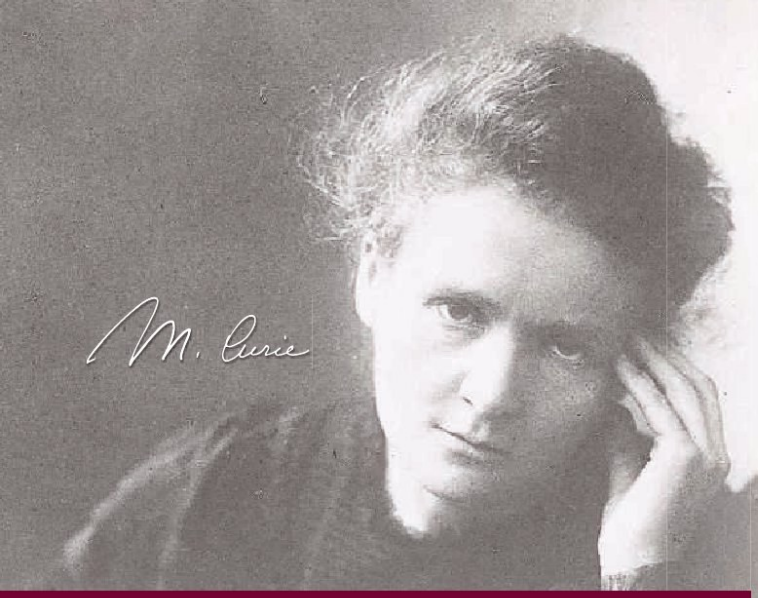
Quatre nouvelles colonies de manchots empereurs

BIODIVERSITÉ Alors que les modèles anticipent une possible disparition de ces oiseaux d'ici à 2100, quatre nouvelles colonies de manchots empereurs ont été découvertes en Antarctique, dont l'une compterait plus de 1000 individus. Cela porte leur nombre à 66. L'évolution et les déplacements de ces populations sont surveillés en suivant, sur les images satellitaires, leurs déjections bien visibles sur la glace blanche. **S. R.**

SOURCE : PETER FRETWELL, BRITISH ANTARCTIC SURVEY, ROYAUME-UNI.



P. FRETWELL/CAMBRIDGE UNIVERSITY



Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

institut Curie

ENSEMBLE, PRENONS
LE CANCER DE VITESSE

curie.fr

Pour tout renseignement contacter Catherine Ricatte - Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.
Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....
Prénom : .....
Adresse : .....
Code postal : |_|_|_|_|_|
Ville : .....
Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

S&A0324

Comment le stress détraque les intestins

Des chercheurs ont observé chez la souris que la régénération de la paroi intestinale est très perturbée en cas de stress chronique.

Des troubles intestinaux en situation de stress psychologique chronique ? La faute (au moins en partie) au microbiote, assure une équipe dirigée par l'Académie chinoise des sciences dans la revue *Cell Metabolism*. Les chercheurs ont en effet observé chez la souris que la régénération de la paroi intestinale est très perturbée en cas de stress chronique. Chose étonnante, cette perturbation est transmissible en réalisant une greffe de microbiote intestinal de souris stressées à des souris non stressées…

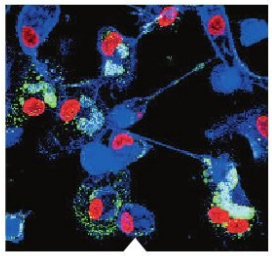
SPL/BSIP

Des concentrations plus élevées d'une molécule affectant les tissus intestinaux ont été retrouvées chez des personnes atteintes de troubles mentaux.

Un mécanisme également à l'œuvre chez l'humain

Ce constat a conduit les scientifiques à établir que ce dysfonctionnement est dû à une molécule (lindole-3-acétique ou IAA) produite par certaines bactéries intestinales. *In vitro*, ils ont montré que l'IAA pouvait bloquer l'activité des cellules souches et affecter ainsi la régénération des tissus intestinaux. Mais l'effet peut être contrecarré par l'ajout d'une autre molécule, l'alpha-cétoglutarate, qui stimule le métabolisme des cellules souches. En l'incluant dans l'alimentation des souris stressées, ce produit a protégé leur intestin.

Selon les biologistes, ce même mécanisme serait à l'œuvre chez l'humain. Ils ont en effet retrouvé des concentrations plus élevées d'IAA chez des patients atteints de dépression majeure ou de trouble bipolaire, notamment chez ceux qui avaient des problèmes de constipation. Une piste pour mieux comprendre les troubles intestinaux inflammatoires liés au stress psychologique ou à de nombreuses maladies mentales. Avec, en plus, l'espoir de les atténuer par l'alpha-cétoglutarate, qui est un supplément alimentaire courant. Reste aussi à explorer le rôle de l'IAA dans l'inflammation des intestins liée à des pathologies telles que le syndrome de l'intestin irritable ou la maladie de Crohn, qui est également sensible au stress. **P. K.**



OLENA SHTANKO / TEXAS BIOMED

Le virus Ebola (en vert) se déplace de cellule en cellule en créant des « nanotubes ».

Les passages secrets d'Ebola

VIROLOGIE À l'origine d'épidémies de fièvres hémorragiques extrêmement létales en Afrique, le virus Ebola peut créer des nanotubes entre des cellules pour passer de l'une à l'autre en évitant le milieu extracellulaire, où il serait vite repéré par le système immunitaire. Une stratégie qui s'ajoute aux réservoirs naturels (gonades, yeux ou cerveau) dans lesquels il peut rester caché pendant des mois avant de resurgir, déclenchant une nouvelle flambée épidémique **N. G. C.**

SOURCE : MARIJA DJURKOVIC, INSTITUT DE RECHERCHE BIOMÉDICALE DU TEXAS, ÉTATS-UNIS.

Une prédisposition génétique à faire des jumeaux

GÉNÉTIQUE La probabilité de donner naissance à des jumeaux dizygotes est accrue par au moins six gènes, selon une étude génétique de plus de 700 000 mères européennes. Ils codent notamment des protéines associées à une plus grande sensibilité à la FSH, hormone stimulant la maturation des follicules producteurs d'ovules. D'autres gènes restent à identifier chez les populations d'origine africaine, où les jumeaux sont plus fréquents. **P. K.**

SOURCE : HAMDI BAREK, UNIVERSITÉ LIBRE D'AMSTERDAM, PAYS-BAS.

LIMICOL®

L'EFFICACITÉ PROUVÉE CONTRE LE CHOLESTÉROL

Le **premier et le seul** complément alimentaire ayant obtenu une allégation de santé exclusive par l'Union Européenne.*

BÉNÉFICE SANTÉ VALIDÉ
par les autorités européennes

PROUVÉ CLINIQUEMENT

-20%

DE LDL-CHOLESTÉROL DÈS 1 MOIS[1]

FORMULE BREVETÉE
ACTIFS NATURELS
ET VITAMINES

Levure de riz rouge

Extrait d'ail

Extrait d'artichaut

Bénéficiez d'une remise exceptionnelle** de

-10%

avec le code **CHOL10**

05 46 56 30 48 | **laboratoire-lescuyer.com** | FORMULATION ET FABRICATION FRANÇAISES

Complément alimentaire à base de monacoline K issue de levure de riz rouge, extraits de plantes et vitamines. Ne doit pas être consommé par les femmes enceintes ou allaitantes, les enfants de moins de 18 ans et les adultes de plus de 70 ans. Si vous avez des problèmes de santé, demandez conseil à votre médecin avant de consommer ce produit.Ne doit pas être consommé en cas de prise de médicaments pour réduire le cholestérol ou si vous consommez déjà d'autres produits contenant de la levure de riz rouge. Ne pas dépasser la dose journalière recommandée (ne pas consommer plus de 3 mg de monacolines par jour). À tenir hors de portée des jeunes enfants. Ne se substitue pas à une alimentation variée, équilibrée et à un mode de vie sain. Plus d'informations sur **www.laboratoire-lescuyer.com**. *La combinaison d'actifs de Limicol® réduit les concentrations de cholestérol LDL dans le sang. Une cholestérolémie LDL élevée constitue un facteur de risque dans le développement des maladies coronariennes. Il existe d'autres facteurs de risque qu'il est également important de surveiller. La modification de l'un de ces facteurs peut ou non avoir un effet bénéfique. Ce produit est destiné aux personnes devant contrôler leur taux de cholestérol sanguin. **Offre valable sur l'ensemble des formats LIMICOL® jusqu'au 30/04/2024. 1 - Réduction moyenne observée lors de 3 études cliniques réalisées sur un total de 184 sujets âgés de 18 à 65 ans, présentant une hypercholestérolémie non traitée : Ogier et al. Eur J Nutr 2013 ; Barrat et al. Int J Food Sci Nutr. 2013 ; Barrat et al. Eur J Nutr 2013

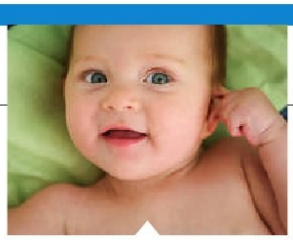
POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE. WWW.MANGERBOUGER.FR

Un test sanguin efficace pour le diagnostic d'Alzheimer

Il est aussi fiable que les mesures classiques de cette protéine effectuées par imagerie dans le cerveau des patients.

Savoir si une personne développe une maladie d'Alzheimer et quel est son degré d'avancement est désormais possible simplement par le dosage dans le sang d'une protéine anormale caractéristique de la maladie, la protéine tau phosphorylée (p-tau217). Selon une étude parue dans la revue *Jama Neurology*, ce test ultrasensible de la société de biotechnologie américaine ALZpath s'avère aussi fiable que les mesures classiques de cette protéine effectuées dans le cerveau des patients par imagerie ou par dosage dans le liquide céphalo-rachidien. Ce dosage sanguin également moins coûteux pourrait ainsi rendre le diagnostic de la maladie très accessible. L'équipe de l'université de Göteborg, en Suède, a même pu suivre ainsi l'évolution de la maladie, du trouble cognitif léger à la démence. *« Les dosages sanguins de la protéine tau pathologique sont un outil d'autant plus prometteur qu'ils arrivent au moment où certains médicaments capables de retarder la progression de la maladie commencent à apparaître »* (*lire* S. et A. *n° 919*), confirme Luc Buée, directeur du centre de recherche Lille Neuroscience & Cognition, qui n'a pas participé à l'étude. **P. K.**

SPL/BSIP



12 petits patients de moins de 3 ans testeront le médicament.

VENTURA-PHOTOALTO/ONLYFRANCE

Un essai de thérapie génique contre la surdité

GÉNÉTIQUE Atteints d'une forme génétique de surdité profonde, 12 enfants de moins de 3 ans vont intégrer l'essai clinique Audiogene lancé à l'hôpital Necker-Enfants malades à Paris. Grâce à une nouvelle thérapie génique, les médecins espèrent rétablir l'audition de ces 12 petits patients qui seront sinon dépendants d'implants cochléaires. Les scientifiques se montrent très optimistes quant au succès de la stratégie. **C. G.**

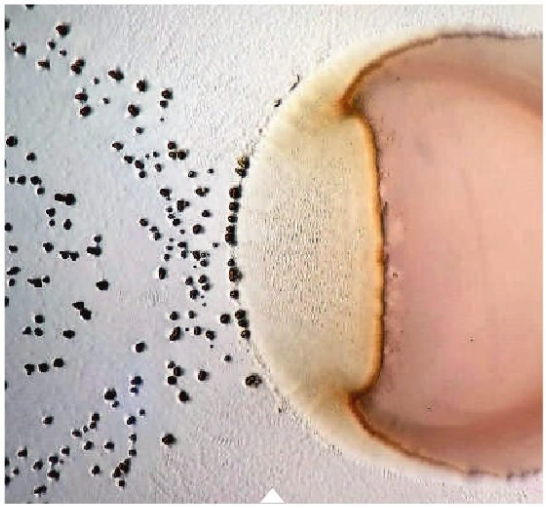
EN DEUX MOTS

CERVEAU Le tabagisme quotidien est lié à une diminution du volume du cerveau, concluent des chercheurs américains après comparaison des images cérébrales de plus de 30 000 personnes. **E-SANTÉ** Le programme en ligne Obecoach, validé par l'Inserm, va tester l'efficacité du coaching nutritionnel en ligne dans le surpoids et l'obésité. **MUSIQUE** S'engager dans une pratique instrumentale tout au long de sa vie est associé à une meilleure santé cérébrale à un âge avancé, selon une étude menée sur 25 000 personnes.

Un traitement prometteur contre la schizophrénie

PSYCHIATRIE Un essai américain rapporte des résultats encourageants contre la schizophrénie, avec une nouvelle classe thérapeutique agissant sur des récepteurs différents des antipsychotiques habituels. Les résultats obtenus par le KarXT (Karuna Therapeutics) chez ces 252 patients en phase aiguë restent à confirmer au long cours pour cette pathologie qui concerne une personne sur 300 dans le monde. **S. R.-M.**

SOURCE : ALAN BREIER, UNIVERSITÉ DE L'INDIANA, ÉTATS-UNIS.



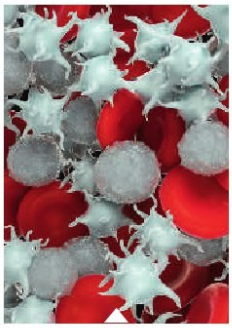
NICOLA MAYRHOFER (CC-BY4.0)

La prédatrice « M. xanthus » (à gauche) tue « P. fluorescens » (à droite) jusqu'à une certaine température où les rôles s'inversent.

Quand la bactérie de proie devient prédatrice

BACTÉRIOLOGIE Une simple variation de température peut bouleverser les rapports entre bactéries. C'est le cas avec *Myxococcus xanthus* et *Pseudomonas fluorescens*. La première est décrite comme une bactérie prédatrice de la seconde ; ce qui est exact si le milieu est à 32 °C. Car lorsque la température baisse d'une dizaine de degrés, c'est *P. fluorescens* qui décime *M. xanthus*. Un peu comme si, après que la savane a subi un léger coup de froid, l'antilope se mettait à chasser le lion ! **H. R.**

SOURCE : MARIE VASSE, CNRS, FRANCE.



PEDDALANKARAMESHBABU/SHUTTERSTOCK

Le médicament empêche la formation des caillots tout en diminuant le risque hémorragique.

Une nouvelle thrombolyse contre l'AVC

NEUROLOGIE Fluidifier le sang tout en diminuant le risque hémorragique qui pèse après le traitement d'un accident vasculaire cérébral. Tel est l'avantage d'une nouvelle molécule issue de la recherche académique française qui vient de démontrer des résultats prometteurs dans l'AVC. Cet anticorps monoclonal aide en plus à la reperfusion du tissu cérébral pour favoriser la récupération. **S. R.-M.**

SOURCE: M. MAZIGHI, UNIVERSITÉ PARIS CITÉ, FRANCE.

IL A DIT

« Aujourd'hui, le premier mot que l'oncologue a en tête, c'est cancer du sein ou cancer du côlon, et pas cancer par mutation EGFR. Il faut changer ça »

Fabrice André, directeur scientifique de l'institut Gustave-Roussy (Villejuif), plaidant pour classifier les cancers non plus selon l'anatomie mais selon leurs caractéristiques moléculaires pour rendre les meilleurs traitements accessibles aux patients.

XINHUA/ICON SPORT

Le vaccin, gratuit, est proposé à tous les enfants de moins de 6 mois.

Première campagne de vaccination contre le paludisme au Cameroun

PROPHYLAXIE La première campagne de vaccination systématique contre le paludisme à grande échelle au monde vient de démarrer au Cameroun. Cette *« étape historique »*, selon l'Organisation mondiale de la santé, prévoit une injection gratuite à tous les enfants de moins de 6 mois avec le vaccin antipaludique RTS,S qui réduit la mortalité, toutes causes confondues, de 13 %. **S. R.-M.**

www.lesproduitsdumois.com

PERTE DE CONCENTRATION ET DE MÉMOIRE ?

Les comprimés naturels **Cerveau Clair** apportent en quelques heures des vitamines et des nutriments aux zones de la concentration et de la mémoire du cerveau.

Ils contiennent de la L-théanine issue du Thé vert, des extraits de Grenade, de Pin maritime et de Noix, ainsi que des Vitamines B et de l'Iode, dont l'efficacité pour améliorer les performances mentales et les fonctions cognitives (mémoire, attention, concentration) a été démontrée dans de nombreuses études scientifiques.

Ils protègent également le cerveau du vieillissement et réduisent la fatigue.

Cerveau Clair tonifie et revitalise le cerveau pour aider à garder les idées claires !

■ En pharmacie - Boîte de 60 comprimés - ACL 2951863 - Convient aux végétaliens - Questions ? New Nordic répond au 01 85 12 12 12 (tarif local) www.vitalco.com

STOP AU CHOLESTÉROL

Et si vous pouviez enfin faire baisser votre taux de mauvais cholestérol ?

ControlStérol aide à **réguler naturellement les taux de « bon » et « mauvais » cholestérol** (HDL et LDL) grâce à une combinaison **unique** d'extraits concentrés d'Ail noir et de Cannelle de Ceylan, associés à une souche brevetée de ferments lactiques, des vitamines et des nutriments essentiels.

Une gélule « jour » et une gélule « nuit » aident à **diminuer le « mauvais » cholestérol** LDL (qui favorise la formation de plaques lorsqu'il est en excès), limitant le risque cardiovasculaire associé, tout en **augmentant le « bon » cholestérol** HDL. **Une solution naturelle, simple, efficace !**

■ ControlStérol boîte 60 gélules végétales (30 gélules « jour » & 30 gélules « nuit ») ACL 6260490. En pharmacie et sur www.controlsterol.com - Plus d'infos au 01 83 96 83 01 (tarif local)

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE

Pour paraître dans cette rubrique, R'Médias 01 46 48 85 41 - photos DR.

La disparition du géant herbivore élucidée

Le gigantopithèque, plus grand primate ayant existé, aurait pâti d'une diminution de la densité des ressources alimentaires.

Le mystère de la disparition de *Gigantopithecus blacki*, le plus grand singe ayant jamais vécu sur Terre, a été élucidé par une équipe internationale de chercheurs chinois, australiens et américains après une enquête minutieuse sur des sites où il a vécu dans le sud de la Chine actuelle. Cette espèce énigmatique de très grand singe a été identifiée il y a près de 90 ans par le paléontologue allemand Gustav von Koenigswald à partir d'une « dent de dragon » retrouvée chez un apothicaire à Hongkong. Depuis, quatre mandibules partielles et quelque 2000 dents ont été mises au jour dans 22 grottes de la région.

Ces vestiges ont révélé un animal d'une taille comprise entre 2 et 3 mètres, soit bien plus que les plus grands gorilles actuels (1,80 m maximum), et un poids approchant les 300 kg. Mais les chercheurs n'avaient pas d'autres indices pour tenter de comprendre sa disparition, d'autant plus énigmatique qu'un autre parent plus proche de l'orang-outang avait survécu durant la même période.

« Gigantopithecus blacki » mesurait entre 2 et 3 m de haut (représentation).

ROMAN UCHYTEL / PREHISTORIC FAUNA

Publiée dans *Nature*, une analyse très détaillée des fossiles et des sédiments qui les contenaient a permis de les dater de plus de 2 millions d'années à environ 200 000 ans, puis de retracer, grâce au pollen et aux éléments contenus dans les dents, l'évolution de l'environnement sur cette période.

Un changement fatal d'environnement

Il s'avère qu'à partir de 700 000 ans, la forêt dense qui fournissait une nourriture abondante tout au long de l'année a peu à peu laissé place à un milieu plus ouvert et herbeux soumis au rythme des saisons. Cette diminution de la densité des ressources alimentaires et leur caractère saisonnier ont entraîné une diversification nécessaire de l'alimentation à laquelle le gigantopithèque, vivant au sol, lourd et peu mobile, n'était pas adapté. Ce changement d'environnement aurait coïncidé avec le lent déclin du géant herbivore.

On ignore si ce scénario reste valable pour d'autres régions d'Asie telles que le Viêt Nam et l'Indonésie, où des restes fossiles de *G. blacki* ont aussi été retrouvés, et quand cet ancêtre du mythique yéti a finalement disparu de la Terre. ■ **P. K.**

Aux origines de la syphilis

PALÉOBACTÉRIOLOGIE De l'ADN extrait de squelettes vieux de 2000 ans retrouvés au Brésil ont permis de reconstruire le génome de *Treponema pallidum*, une famille de bactéries responsables d'infections telle la syphilis. Si l'étude ne permet pas de confirmer que la maladie a été introduite en Europe au retour de Christophe Colomb, elle démontre l'existence d'infections tréponémiques à l'époque précolombienne dans le Nouveau Monde. **H. J.**

SOURCE : KERTTU MAJANDER, UNIVERSITÉ DE ZURICH, SUISSE.

Un chewing-gum révèle les dents abîmées de chasseurs-cueilleurs

AFP

Le morceau de résine de bouleau mâché (à droite) et son moulage.

ARCHÉOLOGIE **L'analyse de poix de bouleau mâché, le « chewing-gum de l'âge de pierre », a révélé le mauvais état bucco-dentaire d'une communauté de chasseurs-cueilleurs de Suède vivant il y a plus de 9500 ans. Des chercheurs y ont déniché de l'ADN de bactéries associées aux maladies gingivales et aux caries.** **J. I.**

SOURCE : EMRAH KIRDÖK, UNIVERSITÉ DE MERSIN, TURQUIE.

À PARTIR DE
6 160 € / pers.
AU DÉPART
DE PARIS

LA RÉGION DES GRANDS LACS
USA - CANADA

DU 2 AU 19 SEPTEMBRE 2024

À BORD DU
MS HAMBURG

Bateau à taille humaine
(380 passagers)

Une croisière unique et originale
à la découverte de deux mondes, de deux cultures
en compagnie d'un conférencier francophone

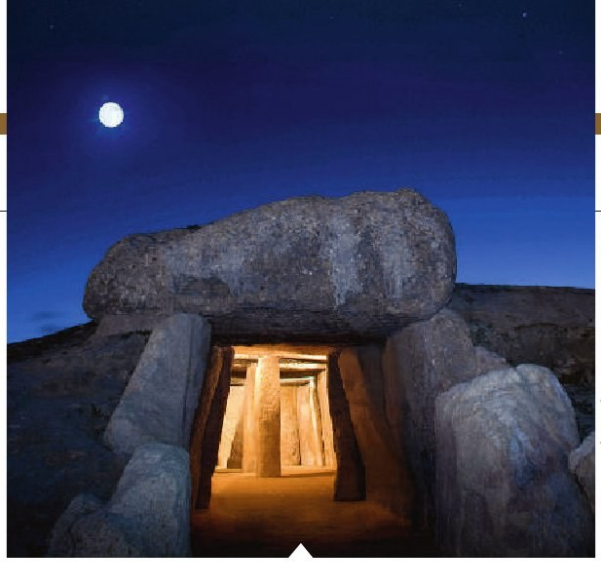
PLEIN CAP CROISIÈRES

Renseignements et réservations

Pour recevoir notre brochure détaillée, contactez le
04 93 20 21 20 ou info@plein-cap.com

Le dolmen de Menga, prouesse du néolithique

Des chercheurs espagnols ont identifié la zone d'extraction de ces pierres colossales.



CONJUNTO ARQUEOLÓGICO DOLMENES DE ANTEQUERA

La chambre funéraire est recouverte de cinq dalles provenant d'une colline voisine et pesant chacune environ 150 tonnes.

Bâti au 4e millénaire avant notre ère dans le sud de l'actuelle Andalousie (Espagne), le dolmen de Menga est composé de deux rangées de 12 orthostates (grand bloc de pierre vertical), trois piliers intérieurs et cinq dalles de couverture — plus de 150 tonnes pour la plus lourde. Un chef-d'œuvre du néolithique qui s'étend sur 25 mètres et pèse en tout plus de 1140 tonnes. Mais d'où viennent ces pierres colossales, et comment ont-elles été transportées ? Une équipe de préhistoriens vient de résoudre le mystère en identifiant la zone d'extraction sur la colline voisine de Cerro de la Cruz. Outre la correspondance des matériaux utilisés, celle-ci présente une topographie favorable au transport vers la colline de Menga, à 850 mètres de distance et à une altitude inférieure de 100 m. *« Compte tenu de la construction de la rampe nécessaire au transport depuis le Cerro de la Cruz, de la taille, du nombre et de la fragilité de ces pierres, le dolmen de Menga représente une réalisation unique, à la pointe de l'ingénierie mégalithique dans l'Ibérie préhistorique et peut-être en Europe »*, selon les chercheurs. Une perfection qui nous permet de l'admirer encore 6000 ans après. **S. de L.**

85 Le nombre d'empreintes humaines de 100 000 ans découvertes au Maroc

PALÉONTOLOGIE Retrouvées sur une plage du nord du Maroc, ces traces de pas laissées par au moins cinq individus seraient les plus anciennes connues en Afrique du Nord et au sud de la Méditerranée. Selon les scientifiques, le groupe était à la recherche de coquillages. **H. J.**

SOURCE : MOUNCEF SEDRATI, CNRS, FRANCE.

CURRENT BIOLOGY/MOONEY ET AL.

Le fragment de peau a été mis au jour dans une grotte d'Oklahoma (États-Unis).

Une peau fossilisée vieille de 289 millions d'années

HERPÉTOLOGIE Ce sont les plus anciens morceaux d'épiderme préservés. Retrouvée dans un système de grottes en Oklahoma (États-Unis), cette peau appartenait à un reptile vieux de 289 millions d'années. Mais il est impossible d'identifier de quelle espèce elle provient. Elle partage avec les reptiles modernes des aspérités de surface semblables à celles des crocodiles et des écailles ressemblant à celles des serpents. **J. I.**

SOURCE : ETHAN MOONEY, UNIVERSITÉ DE JILIN, CHINE.

Des « H. sapiens » pionniers en Europe du Nord

ANTHROPOLOGIE Des pointes en pierre *(photo ci-contre)* longtemps attribuées à des néandertaliens faisaient en réalité partie de la boîte à outils de groupes pionniers d'*Homo sapiens*. Des fouilles de grande ampleur dans la grotte Ilsenhöhle à Ranis (Allemagne), partiellement excavée dans les années 1930, révèlent en effet que ces hommes modernes avaient déjà atteint le nord-ouest de l'Europe il y a 45 000 ans, plusieurs milliers d'années avant que les néandertaliens disparaissent du continent. **H. J.**

SOURCE : JEAN-JACQUES HUBLIN, COLLÈGE DE FRANCE

JOSEPHINE SCHUBERT, MUSEUM BURG RANIS

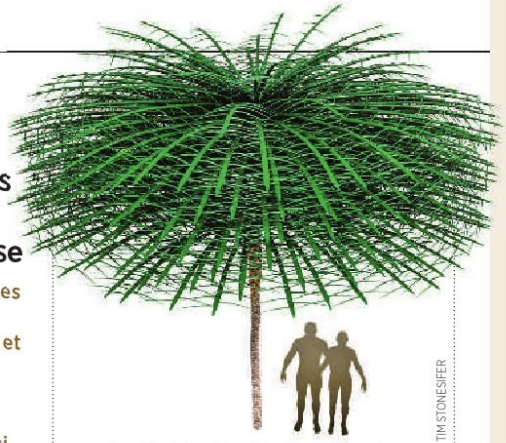
Une capsule temporelle au Parlement néerlandais

ARCHÉOLOGIE Une capsule temporelle vieille de 99 ans a été découverte cachée sous une statue du dernier empereur d'Allemagne et roi de Prusse Guillaume II, lors de rénovations au Parlement néerlandais à La Haye (Pays-Bas). La boîte en métal a été ouverte en public le 29 janvier, révélant des lettres, des documents et le récit en trois volumes, en langue française, des batailles néerlandaises contre Napoléon, dont le déroulé de la bataille de Waterloo (1815) par François de Bas, un célèbre historien militaire de l'époque. **M. B.**

Les dinosaures souffraient aussi d'arthrose

PALÉONTOLOGIE Les Abelisauridés, gros dinosaures bipèdes et carnivores qui évoluaient en Amérique du Sud, souffraient eux aussi de pathologies articulaires. Trois lésions osseuses différentes sur trois squelettes ont été recensées par une étude : deux vertèbres soudées dues à une malformation congénitale, une autre atteinte vertébrale probablement causée par une arthrite inflammatoire et un tibia déformé par un mal inconnu. **J. I.**

SOURCE : MATTIA BAIANO, UNIVERSITÉ NATIONALE DE RIO NEGRO, ARGENTINE



TIM STONESIFER

Les feuilles de « Sanfordiacaulis densifolia » formaient une ombrelle de plus de 5 m de large (modélisation).

L'étrange forme des premiers arbres

PALÉOBOTANIQUE La préservation exceptionnelle d'arbres fossilisés, troncs et feuilles compris, a permis de reconstituer l'allure et le feuillage des *Sanfordiacaulis densifolia*, qui poussaient au Canada il y a 350 millions d'années. Environ 250 feuilles, mesurant jusqu'à 1,75 m de longueur, formaient une ombrelle de plus de 5 m de large soutenue par un tronc d'à peine 16 cm de diamètre. **J. I.**

SOURCE : ROBERT GASTALDO, SMITHSONIAN MUSEUM, ÉTATS-UNIS.

KHALED DESOUKI / AFP

Les travaux portent sur le parement de la pyramide de Mykérinos.

La rénovation d'une pyramide de Gizeh fait polémique

ÉGYPTOLOGIE L'étonnante décision des autorités égyptiennes de restaurer les blocs de granit qui recouvraient autrefois la pyramide de Mykérinos, la plus petite des trois pyramides principales du plateau de Gizeh, a suscité une vive inquiétude chez les scientifiques. Alors que les critiques déferlent, le ministère égyptien des Antiquités a fini par annoncer la formation d'un comité d'étude pour réévaluer l'initiative, jusqu'ici présentée comme « le projet du siècle ». **M. B.**

NASA, ESA, CSA - PBS - THIRTEEN PRODUCTIONS LLC - AFP

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

EXOBIOLOGIE

L'origine de la vie au cœur des glaces interstellaires

Le vivant pourrait trouver son origine dans les glaces interstellaires. À ces températures extrêmement basses, l'acide carbamique, potentiel précurseur d'acides aminés, se serait formé et resté stable durant la formation de notre étoile et des planètes du Système solaire. À lire sur le site de *La Recherche*. bit.ly/4bs7jJP

VIDÉOS

Quand les sciences s'animent

Expériences au cœur des laboratoires ou reportages auprès des scientifiques, retrouvez les vidéos de *Sciences et Avenir*. sciav.fr/925video

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

Le bouquet final du caméléon mourant

Une séquence vidéo a capté l'étonnante explosion de couleurs qui précède la mort d'un caméléon. Un phénomène classique, mais toujours saisissant. sciav.fr/925camele

5 minutes

Pourquoi la carotte devient molle au frigo

Grâce à une caméra et des modèles mathématiques, un physicien a étudié le flétrissement des carottes dans un réfrigérateur. Il montre comment mieux les conserver. sciav.fr/925carotte

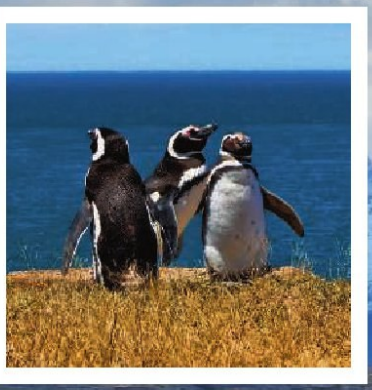
10 minutes

À la recherche de la matière noire

Au synchrotron de Hambourg (Allemagne), les chercheurs traquent les axions, hypothétiques particules qui expliqueraient la nature de la matière noire. Reportage. sciav.fr/925axion

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

Exclusif : découvrez les merveilles de la Patagonie en croisière



Scannez ce QR code pour télécharger la brochure

EMBARQUEZ POUR LE BOUT DU MONDE

Voyages d'exception

Partez avec Voyages d'exception pour une **croisière francophone** en compagnie de **conférenciers**, sur les traces des plus grands navigateurs, à bord d'un navire spacieux et élégant.

PLUSIEURS DÉPARTS :

NOV. 2024 • FÉV. 2025

Dès **5 590 €**/pers.*

depuis Paris - pension complète

- CROISIÈRES FRANCOPHONES
- ACCOMPAGNEMENT DEPUIS PARIS
- CONFÉRENCIERS DE PRESTIGE

Réservations et informations

Demandez notre brochure détaillée au **01 75 77 87 48**, par e-mail à **contact@voyages-exception.fr**, sur **voyages-exception.fr/brochures** (code SPATA à renseigner), ou contactez votre agence de voyages.

CGV disponibles sur notre site. Photos : ©AdobeStock ©Holland America

VOYAGES-EXCEPTION.FR

*Prix incluant une remise de 400€/pers. pour toute réservation avant le 31 mars 2024. L'itinéraire est différent selon les dates de départ. plus de détails sur notre site.

ÉNERGIE NOIRE

La force qui déchire l'Univers

Depuis la découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers, la communauté scientifique se passionne pour cette mystérieuse force qui contrecarre la gravitation. Trois nouveaux instruments d'observation bientôt opérationnels devraient fournir des données essentielles sur la nature de l'énergie noire.

Dossier réalisé par
Fabrice Nicot
et Sylvie Rouat

THÉORIES
Quatre candidates pour l'énergie noire
p. 28

INSTRUMENT
Le satellite Euclid mène l'enquête
p. 32

ENTRETIEN
Nathalie Palanque-Delabrouille, porte-parole de la mission DESI p. 37

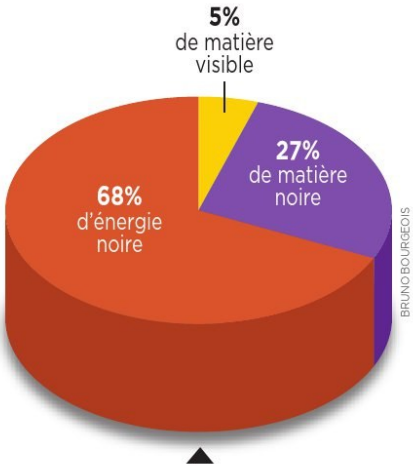
La nature de l'énergie noire, qui pousse l'Univers à accélérer son expansion depuis près de 6 milliards d'années, est l'une des grandes inconnues de la cosmologie moderne, que les chercheurs tentent d'éclaircir.

MARK GARLICK/SPL/SUCRE SALÉ

Quatre candidates pour l'énergie noire

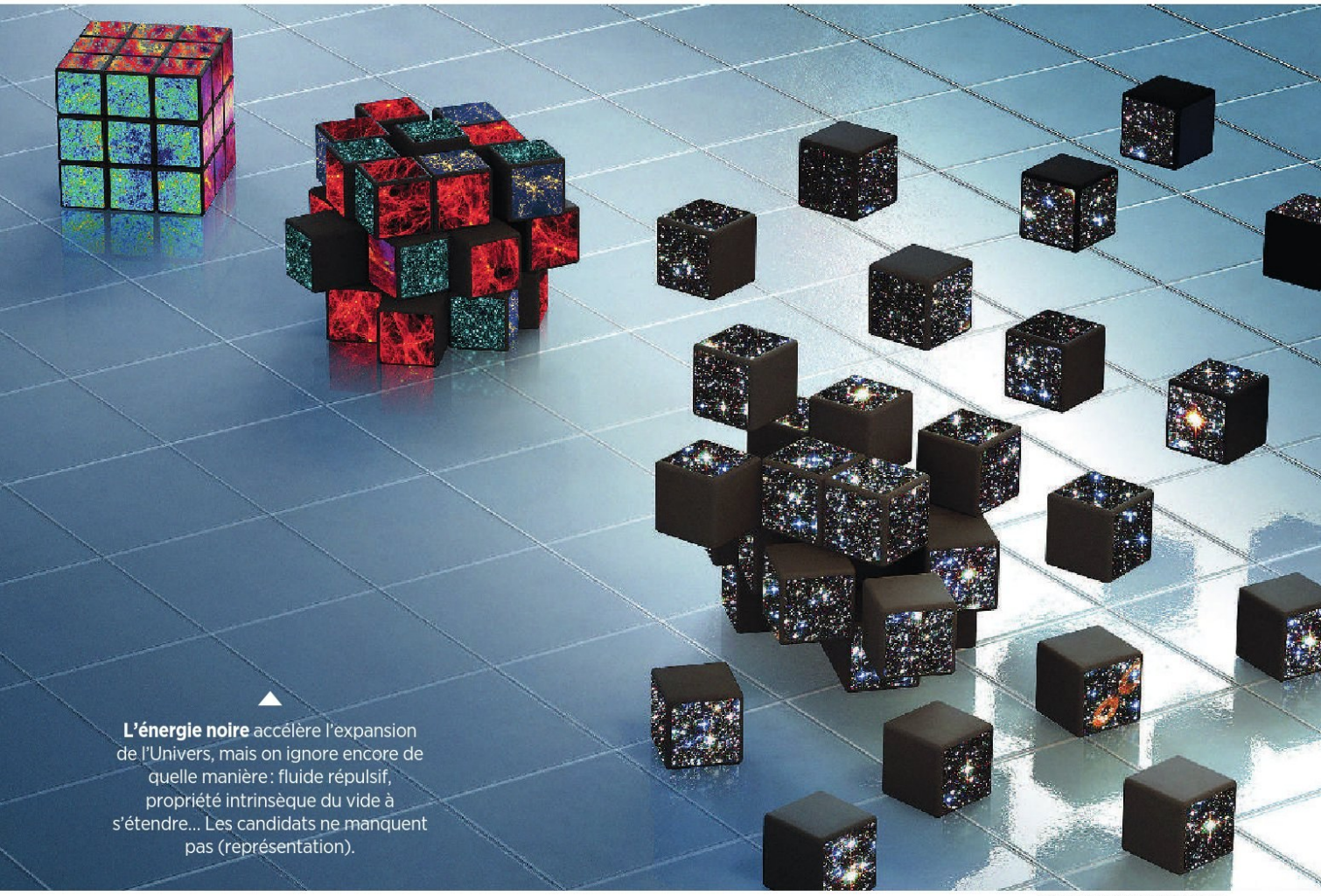
Quelle est cette mystérieuse force qui provoque l'accélération de l'expansion de l'Univers ? Depuis plus de vingt-cinq ans, la communauté scientifique tente de trouver une explication. Si les théories ne manquent pas — notre liste n'est pas exhaustive —, les preuves se font attendre.

« *Les résultats sont très surprenants, voire choquants. […] Abordez [-les] non pas avec votre cœur ou votre tête, mais avec vos yeux. Nous sommes des observateurs après tout !* » Ce message électronique a été adressé le 12 janvier 1998 par l'astrophysicien Adam Riess à ses collègues de l'équipe High-Z-Supernovae. « *La veille de ma nuit de noces, sous le regard courroucé de ma femme* », précisera-t-il par la suite…
Quels étaient ces résultats si urgents ? Ils concernaient rien de moins que le destin de l'Univers, et allaient être à l'origine, bien des années plus tard, de la construction de trois instruments inaugurés récemment *(lire p. 37)*. Le projet High-Z supernovae consistait à mesurer l'ampleur du ralentissement de l'expansion de l'Univers. La conclusion que le chercheur américain envoie à ses collègues dit précisément l'inverse : l'expansion de l'Univers accélère. Une nouvelle fracassante confirmée la même année par une seconde équipe, celle du Supernova Cosmology Project (CSP) dirigée par l'Américain Saul Perlmutter, ce qui lui vaudra le prix Nobel de physique en 2011 avec Adam Riess et Brian P. Schmidt, fondateur du projet High-Z Supernovae…
Les deux études découlent de campagnes d'observations de supernovae, ces étoiles en fin de vie qui explosent spectaculairement. Elles brillent tout à coup comme des centaines de millions de soleils, constituant de vrais phares dans l'Univers. Pour un certain type de supernovae, les « SNIa », il est possible de déterminer la quantité de lumière qu'elles émettent à l'origine *(lire l'encadré p. 31)*. En comparant avec l'éclat que l'on perçoit sur Terre, il est facile de définir leur distance par rapport à nous. Entre 1994 et 1997, les deux groupes étudient des dizaines de ces SNIa, notamment grâce au télescope spatial Hubble. C'est ainsi qu'ils constatent que ces supernovae sont environ 20 % moins lumineuses qu'attendu dans un univers tel qu'on se le représentait alors, composé uniquement de matière et d'énergie. Il grandit donc plus vite…



L'Univers est très majoritairement composé (95 %) d'énergie noire et de matière noire, dont on ignore la nature.

La seule interaction capable d'agir sur de grandes distances est la gravitation, et celle-ci rapproche les corps. Si l'expansion initiale due au Big Bang ne fléchit pas avec le temps, il faut se rendre à l'évidence : l'Univers comprend un ingrédient supplémentaire dont on sait seulement qu'il contrecarre la gravitation. Il est baptisé « énergie noire », « Dark Energy » en anglais, dès août 1998 par Michael Turner, de l'université de Chicago (États-Unis), lors d'un colloque consacré à ce nouveau venu.
Bien que les cosmologistes aient été surpris par cette découverte, ils l'acceptent très vite, comme l'explique Francis Bernardeau, chercheur à l'Institut de physique théorique de Saclay (Essonne). « *La communauté était prête à basculer car elle se confrontait à plusieurs problèmes. Des étoiles semblaient plus âgées que l'âge de l'Univers, par exemple. L'accélération du taux d'expansion signifie que l'Univers est plus vieux qu'on l'imaginait, ce qui résout le problème. L'autre souci majeur était la densité de l'Univers. La quantité de matière classique et de matière noire paraissait bien trop faible pour un univers dont la géométrie, dictée par*



L'énergie noire accélère l'expansion de l'Univers, mais on ignore encore de quelle manière : fluide répulsif, propriété intrinsèque du vide à s'étendre… Les candidats ne manquent pas (représentation).

KENN BROWN MONDOLITHIC STUDIOS

la masse et l'énergie qu'il contient, est plane. Il manquait bel et bien quelque chose dans sa composition. »

PREMIÈRE CANDIDATE
Constante cosmologique et énergie du vide

Ce quelque chose, c'est donc l'énergie noire, dont on estime qu'elle représente environ 68 % de l'énergie totale de l'Univers *(voir l'infographie ci-contre)* Mais si elle permet de résoudre certaines incohérences, elle ne livre rien de sa nature. Même si, là encore, les cosmologistes ont d'emblée une candidate : la constante cosmologique. Cette dernière est intégrée aux équations de la relativité générale décrivant comment la matière et l'énergie déforment l'espace-temps par Albert Einstein lui-même. *« Il l'a utilisée afin que ces équations décrivent un univers à la fois stable et fini, comme il concevait l'Univers à cette époque, 1915, où l'on ne connaissait même pas l'existence d'autres galaxies que la nôtre »*, explique Francis Bernardeau. La caractéristique de cette constante cosmologique est d'exercer une pression négative sur la matière. Mais qu'est-ce qu'une pression négative ? *« À trois dimensions, c'est impossible à concevoir,* prévient le physicien. *Mais à une dimension, on peut se faire une idée. Il suffit pour cela de comparer l'action d'un ressort comprimé entre vos deux doigts avec celle d'un élastique étiré entre vos deux doigts. Vous sentez que le sens de la pression n'est pas le même. La pression est positive dans le premier cas, négative dans l'autre. »*

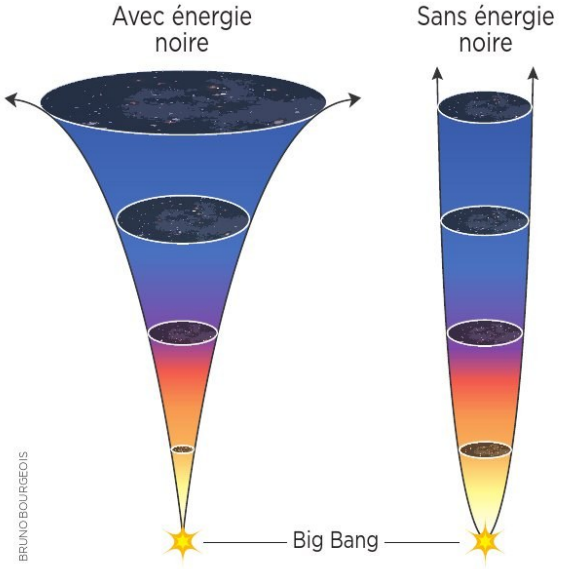
En 1927, l'astronome et cosmologiste belge Georges Lemaître démontre que l'Univers tout entier est en expansion. Le fait est confirmé par les observations de l'Américain Edwin Hubble en 1929, qui constate que les galaxies s'éloignent de nous. Patatras ! Albert Einstein doit renoncer à son univers immuable.

Il rejette la constante cosmologique par la même occasion, la qualifiant de *« plus grande bévue »* de sa carrière… Avec la découverte de l'énergie noire répulsive, elle revient donc par la grande porte. Mais cela ne lui donne pas une signification physique pour autant. On peut la voir comme une propriété intrinsèque de l'espace, une propension naturelle à s'étendre. Mais d'où vient cette propension ? Mystère. Sauf à considérer une autre interprétation. La constante cosmologique serait une propriété intrinsèque du vide de l'espace qui, selon la physique quantique, n'est pas vide. À la manière d'une écume sur l'océan, il émerge sans cesse de ce vide des particules qui disparaissent presque aussi vite. Leur énergie serait-elle l'énergie noire ? On sait donc que celle-ci représente environ 70 % de l'énergie totale de l'Univers. Mais la physique quantique prévoit une densité d'énergie bien supérieure, d'un facteur 10^{120} ! De ce côté-là, nous sommes donc dans l'impasse. *« Ce désaccord nous amène pour l'instant à faire le deuil d'une constante cosmologique qui serait une constante fondamentale de la nature, comme la vitesse de la lumière ou la masse de l'électron,* conclut Francis Bernardeau. *Si l'énergie noire n'est pas une constante fondamentale, alors elle est issue d'un processus dynamique pour lequel il faut échafauder une théorie.* »

DEUXIÈME CANDIDATE
La quintessence

L'une de ces théories, élaborée dès la découverte de l'énergie noire notamment par les Américains Robert R. Caldwell et Paul J. Steinhardt, porte le joli nom de « quintessence ». C'est une allusion à la « cinquième essence », qui évoque le concept d'éther remontant à l'Antiquité. Jusqu'au XIXe siècle, on supposait qu'il servait de support aux ondes lumineuses… La quintessence s'inspire de l'inflation cosmique, cette formidable dilatation de l'espace-temps alors que l'Univers avait autour de 10^{-34} seconde. Après tout, l'énergie noire dilate aussi l'Univers, même si c'est de façon bien plus mesurée.

L'ennui, c'est que si l'inflation est aujourd'hui communément admise, le mécanisme qui en est à l'origine reste inconnu. Mais il y a des hypothèses, comme celle de la présence d'un champ scalaire. Ce concept délicat revient à considérer que les particules se trouvent uniquement sous la forme d'un champ d'énergie. C'est un peu comme lorsque vous versez des gouttes d'eau dans un verre : elles cessent d'exister sous la forme de gouttes pour former une petite flaque. Ici, on oublie les particules pour ne considérer que des champs. *« L'avantage de la théorie des champs, c'est que l'on peut trouver des configurations où la pression exercée par le champ est négative. Il pourra donc jouer le rôle dynamique de quelque chose qui repousse »*, souligne Francis Bernardeau. Par ailleurs, ces champs scalaires existent : le fameux boson de Higgs par exemple, responsable de la masse des particules, est la particule associée au champ scalaire de Higgs. Mais il reste à trouver quel est le champ responsable de l'énergie noire…



Jusqu'en 1998, les cosmologistes pensaient que l'expansion de l'Univers était constante ou en légère décélération (à droite). L'observation des supernovae de type « Ia » a montré qu'en réalité, elle accélère (à gauche).

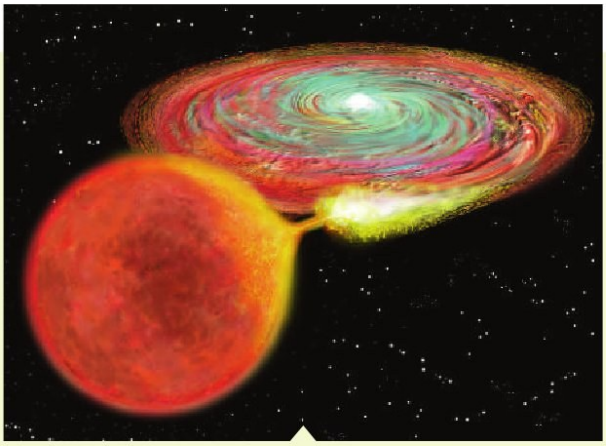
TROISIÈME CANDIDATE
Une modification de la relativité générale

Les autres pistes sont plus surprenantes encore… Comme la remise en cause de la théorie de la relativité, autrement dit de la gravitation elle-même. *« On sait que la théorie de la gravitation d'Einstein est incomplète puisque lorsqu'on se rapproche du centre d'un trou noir, elle ne peut décrire ce qui s'y passe,* explique David Elbaz, directeur scientifique du département d'astrophysique du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), à Saclay. *Donc si la théorie ne fonctionne pas pour l'extrêmement petit, on peut supposer qu'elle échoue aussi dans l'infiniment grand. Or, par un étrange hasard, quand je regarde les grandes distances dans l'Univers, je m'aperçois que la gravitation ne fonctionne effectivement pas. Ou en tout cas, elle me donne à penser qu'il existe une mystérieuse énergie noire qui accélère l'expansion de l'Univers. Alors qu'il s'agit peut-être tout simplement de réécrire les équations de la relativité générale, sans invoquer cette énergie noire. Ce sont ce que*

SUPERNOVAE

Les « chandelles » de l'Univers

Il s'agit d'une catégorie bien particulière de supernova dite thermonucléaire. Elle met en scène un couple d'étoiles, dont l'une au moins est une naine blanche, le dernier stade d'évolution d'une étoile de masse faible. Il n'en reste que le noyau, extrêmement dense : c'est comme si le Soleil tout entier était comprimé dans un volume de la taille de la Terre. L'attraction gravitationnelle du cadavre stellaire aspire alors la matière de sa compagne. Cet afflux de masse comprime davantage la naine blanche. Le carbone et l'oxygène qui la composent en partie fusionnent, libérant d'importantes quantités d'énergie. Cela chauffe l'étoile jusqu'à plusieurs milliards de degrés. Elle explose alors en supernova. Malgré quelques zones d'ombre, le mécanisme est assez bien compris et permet aux astrophysiciens d'estimer la luminosité intrinsèque de la supernova de type « Ia », et sa décroissance au fil du temps. Ce qui en fait une « chandelle standard », une source de lumière « étalon » dans l'Univers. Les supernovae plus classiques, de type « II » impliquant une seule étoile s'effondrant sur elle-même, ont une luminosité très variable, en intensité comme en durée, et ne peuvent donc servir de repère.



RUSSELL KIGHTLEY / SPL / SUCRÉ SALÉ

La matière d'une étoile de type « géante rouge » (à gauche, illustration) est aspirée par sa compagne, une naine blanche. Cette dernière finira par exploser en supernova de type « Ia ».

l'on appelle les théories modifiées de la gravitation, qui intéressent beaucoup de théoriciens ici au CEA… »

QUATRIÈME CANDIDATE
La théorie holographique

La remise en cause des théories actuelles peut aller encore bien au-delà, avec l'holographie par exemple (*lire* S. et A. *n° 920, p. 35*). Le principe holographique implique que les phénomènes gravitationnels dans un espace à trois dimensions peuvent être décrits par des champs quantiques situés sur la frontière à deux dimensions de cet espace. Comme si toutes les informations d'une sphère étaient contenues à sa surface. *« Dans certains cadres théoriques, on peut ainsi décrire l'Univers uniquement à partir de deux dimensions d'espace,* détaille David Elbaz. *Cela nous amène à questionner la structure même de l'espace-temps. Un théoricien comme le Néerlandais Erik Verlinde explique ainsi que l'accélération de l'expansion de l'Univers est la conséquence d'une illusion d'une troisième dimension ! L'énergie noire peut nous entraîner vraiment très loin…* »

On saisit davantage l'effort sans précédent déployé en cosmologie pour l'étudier, avec trois instruments consacrés à cette exploration : DESI à l'observatoire de Kitt Peak en Arizona (États-Unis), le télescope spatial européen Euclid et le télescope américain de grande taille Vera-Rubin *(lire p. 37)*… *« Tous ces instruments ont un même objectif : étudier l'évolution de l'énergie noire au fil du temps,* résume Francis Bernardeau. *Car selon la théorie considérée, cette évolution ne sera pas la même. Dans le cas de la quintessence par exemple, l'énergie noire se dilue un peu au fil du temps… Son action dans le passé est donc renforcée. Tandis que si l'énergie noire est en réalité une propriété intrinsèque de l'espace-temps, une "constante cosmologique", alors elle ne se dilue pas.* » Voilà pourquoi les différents instruments auront en commun de cartographier l'Univers jusqu'à des époques très reculées.

L'objectif est d'observer l'organisation de la matière, qu'il s'agisse de galaxies, d'amas de galaxies ou d'amas d'amas, tout en tenant compte de l'influence constante de la gravitation en compétition avec l'énergie noire. Les premiers résultats devraient arriver cette année (DESI) et 2025 (Euclid). Les astrophysiciens se gardent bien de faire des pronostics. *« Je suis agnostique lorsqu'il s'agit de choisir une hypothèse plutôt qu'une autre,* confie Francis Bernardeau. *Nous commençons seulement l'étude de l'expansion de l'Univers avec cette génération d'instruments conçus pour cela. Selon ce qu'ils trouveront, ils détermineront les prochaines expériences à mener. Un nouveau cycle débute pour la cosmologie, mais aussi pour toute la physique. C'est enthousiasmant, mais il faudra être patient.* » ■ **F. N.**

Euclid mène l'enquête

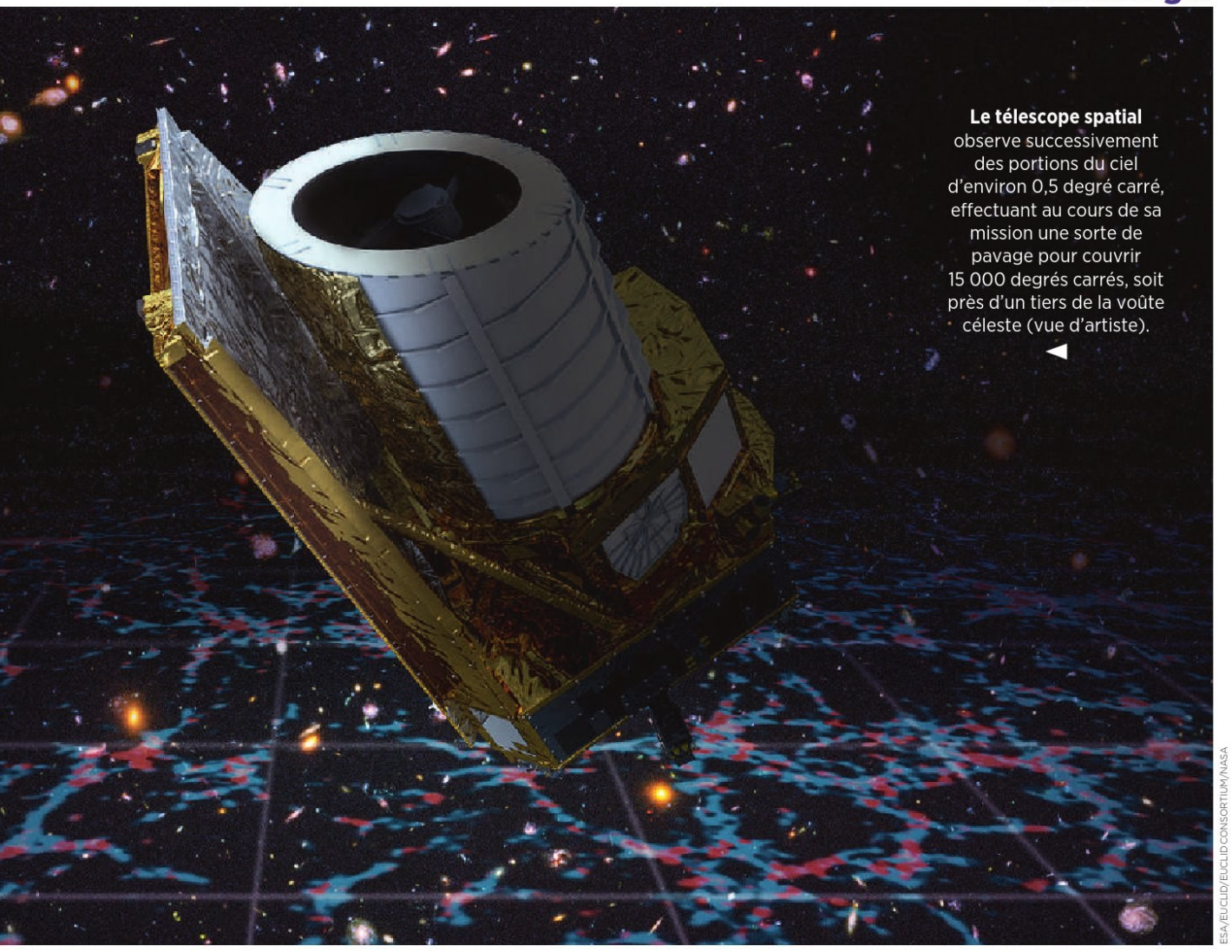
Pendant six ans, l'observatoire spatial de l'ESA va scruter près de deux milliards de galaxies. Une énorme moisson d'images qui devrait permettre de comprendre où et comment l'Univers accélère son expansion.

Sommes-nous à l'aube d'un renversement de perspective cosmologique ? À un passage de gué cognitif semblable à celui qui nous a menés d'un système où la Terre était le centre de l'Univers vers celui qui a mis le Soleil au milieu de l'échiquier ? *« La période est scientifiquement embarrassante,* reconnaît Guiseppe Racca, directeur du programme Euclid à l'Agence spatiale européenne (ESA). *Nous savons aujourd'hui que 95 % de la composition de l'Univers nous sont inconnus.* » Les découvertes des dernières décennies ont montré en effet que celui-ci est composé à seulement 5 % de matière ordinaire, d'atomes qui composent notre corps, notre environnement et l'Univers connu. Le reste du cosmos est dominé à 68 % par l'énergie noire et à 27 % par la matière noire : deux composantes dont nous ne savons quasiment rien. *« Les observations spatiales relèvent des tensions à tous les échelons du modèle de gravité générale,* souligne David Elbaz, astrophysicien au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), à Saclay (Essonne). *C'est un cauchemar : notre modèle de gravité semble cassé, gouverné à 90 % par des baryons noirs ! Pourtant toutes les observations valident la théorie de la relativité générale d'Einstein. Notre objectif est d'aller au-delà de la pensée d'Einstein. Avec Euclid, nous nous lançons dans l'inconnu.* »

Lancé le 1er juillet 2023, le satellite européen, qui porte le nom du père antique de la géométrie, doit permettre de découvrir de nouvelles voies de compréhension de l'Univers. Il a d'abord rejoint le point de Lagrange L2, une région de l'espace à 1,5 million de kilomètres de la Terre qui lui offre une vue complète du ciel, loin des influences gravitationnelles de la Terre, du Soleil ou de la Lune. Après une première période de tests et de calibrage des instruments, Euclid a commencé sa mission scientifique en février. Un moment capital pour les équipes, après douze ans de développement, dans lequel ont été impliquées 3500 personnes, dont plus de 1500 scientifiques de 17 pays. Pendant six ans, l'observatoire spatial va scruter près de deux milliards de galaxies sur environ 36 % du ciel (15 000 degrés carrés). Soit la portion de ciel qui n'est éclairée ni par le Système solaire ni par la Voie lactée ou tout autre nuage de poussières proche, et qui permet donc d'accéder à toutes les échelles cosmiques, des galaxies proches jusqu'aux plus grands filaments de matière de l'Univers profond.

Une topographie de la distribution de la matière noire

Le germe de cette mission remonte à 1998, lorsque deux équipes indépendantes montrent que l'expansion de l'Univers, censée décélérer sous l'effet de la gravité, est en réalité entrée dans une étrange phase d'accélération *(lire p. 28)*. Ce phénomène inexplicable, qui va à l'encontre des modèles existants, sous-entend *« l'existence d'une nouvelle composante, d'une nouvelle interaction*



Le télescope spatial observe successivement des portions du ciel d'environ 0,5 degré carré, effectuant au cours de sa mission une sorte de pavage pour couvrir 15 000 degrés carrés, soit près d'un tiers de la voûte céleste (vue d'artiste).

ESA/EUCLID/EUCLID CONSORTIUM/NASA

fondamentale, qu'on appelle génériquement l'énergie noire, note Yannick Mellier, astronome à l'Institut d'astrophysique de Paris et responsable de la mission Euclid. *Nous savons que cet effet d'accélération de l'expansion a pris place au cours des dix derniers milliards d'années. C'est donc cette échelle cosmique que nous allons explorer, puis couper en tranches temporelles afin de regarder comment l'Univers se structure en fonction de son âge.* » L'objectif étant de comprendre quand et comment l'énergie noire a pris en main le destin de l'Univers. Pour cela, Euclid dispose d'un télescope de 1,2 mètre de diamètre qui alimente en photons deux instruments : un imageur visible (VIS), qui produit des images de 620 mégapixels, et un spectromètre-photomètre infrarouge (NISP), le plus grand imageur infrarouge jamais envoyé dans l'espace. La mission va ainsi réaliser une topographie de la distribution de la matière noire dans l'Univers, le rôle des montagnes étant ici joué par les grandes concentrations de matière. L'hypothèse de l'existence d'une matière dite noire a été faite en 1933 par l'astronome suisse Fritz Zwicky. Afin d'évaluer la masse totale de l'amas de la Chevelure de Bérénice, il a eu l'idée de comparer la quantité de lumière émise par les populations d'étoiles à la « masse dynamique », c'est-à-dire celle que l'on peut déduire de la vitesse de rotation des galaxies. Il découvre ainsi que cette dernière est 400 fois plus grande que

I4P

« Nous allons explorer l'échelle cosmique des 10 derniers milliards d'années et voir comment l'Univers se structure en fonction de son âge »

Yannick Mellier, astronome à l'Institut d'astrophysique de Paris et responsable de la mission Euclid

la masse lumineuse ! De même, sans matière noire, les étoiles orbitant en périphérie d'une galaxie, où la gravité est plus diluée, devraient se déplacer plus lentement que celles du centre. Pourtant, les observations montrent que les unes et les autres tournent à peu près à la même vitesse, ce qui suggère à nouveau la présence d'une grande quantité de masse invisible. Une matière qui ne produit aucun rayonnement n'est pas faite d'atomes et n'a aucune interaction avec la matière ordinaire, si ce n'est par la gravitation.

Mais comment cartographier quelque chose que l'on ne voit pas ? « *Il y a deux approches particulièrement intéressantes,* souligne Yannick Mellier. *La première consiste à observer les effets de lentilles gravitationnelles. Mais à des échelles cosmologiques, ces effets sont extraordinairement faibles et nécessitent des mesures de très haute précision. L'autre approche consiste à mesurer statistiquement l'évolution des galaxies sous l'effet de la gravité, leur regroupement progressif au cours du temps.* » Le film de la structuration de la matière devrait en effet nous aider à comprendre le rôle de l'énergie noire dans l'équation de l'Univers.

La première piste d'enquête s'appuiera sur la haute sensibilité de l'instrument VIS, qui doit permettre « *d'imager en lumière visible la forme d'une galaxie avec une précision de 1 %,* détaille David Elbaz. *Et ainsi de déceler les plus infimes déformations engendrées par la présence de matière noire dans la ligne de visée.* » Selon la théorie de la relativité générale, l'espace-temps se comporte, en quelque sorte, comme une trame courbée localement par la masse des astres — étoiles, trous noirs, galaxies —, mais aussi par celle d'agrégats de matière noire. Lorsque les rayons de lumière passent au voisinage de ces collines ou chaînes de montagnes invisibles, ils sont défléchis : un phénomène appelé lentille gravitationnelle. Celle-ci est dite forte lorsqu'elle produit des effets optiques remarquables : multiplication des images d'une source unique, création d'arc ou d'anneaux lumineux — les anneaux d'Einstein. Les effets de lentilles gravitationnelles faibles sont autrement plus subtils et n'entraînent que de légères distorsions de la forme des galaxies lointaines, décrites par les astrophysiciens comme des « étirements » ou des « cisaillements ».

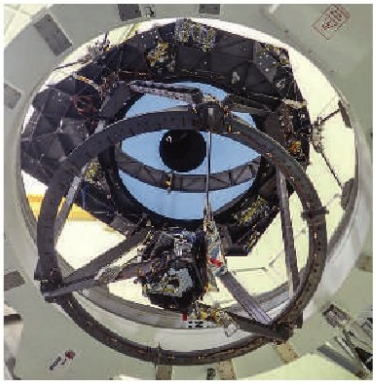
L'accès à la troisième dimension grâce à l'infrarouge

La seconde voie de recherche exploitera les données capturées par le spectromètre infrarouge NISP, qui enregistrera 64 mégapixels par observation. Les galaxies lointaines, qui s'éloignent de nous du fait de l'expansion de l'Univers, émettent une lumière étirée vers des longueurs d'onde plus étendues, passant du spectre visible vers l'infrarouge. « *Quand la voûte céleste nous offre une vue en deux dimensions de l'Univers, la spectrométrie infrarouge permet d'accéder à sa troisième dimension* », note David Elbaz. Les données produites par NISP vont éclairer d'un jour nouveau les amas de galaxies, les plus massives des structures de l'Uni-

TRAITEMENT

Des pétaoctets de données

La cosmologie est aujourd'hui passée dans un régime de haute précision, qui nécessite de collecter toujours plus de données. « *Leur traitement statistique est l'un des plus grands défis de la mission Euclid,* remarque Yannick Mellier, chercheur à l'institut d'astrophysique de Paris. *Aucune mission spatiale n'a jamais produit la masse d'informations complexes que nous nous apprêtons à recevoir au cours des six prochaines années. Il a été incroyablement compliqué d'organiser la chaîne de traitement des paramètres de forme de galaxies dans le spectre visible, combinés à des mesures infrarouges, que nous allons comparer avec des profils enregistrés depuis des télescopes au sol sur plus d'un milliard de galaxies. Dix ans de travail ont été consacrés à cette partie de la mission !* » Euclid doit en effet enregistrer plus de 500 000 images et spectres électromagnétiques de plus de 10 milliards de sources, en lumière visible et proche infrarouge. Soit au moins dix pétaoctets (10^{15} octets) de données brutes, dont le traitement sera réalisé à l'aide de neuf centres de calcul, répartis en Europe et en Californie, et du travail de 450 personnes. L'intelligence artificielle sera également utilisée, pour « nettoyer », par exemple, les interférences des rayons cosmiques dans les données. Les volumes d'informations sont tels et leur traitement à ce point complexe que cette partie de la mission représente 50 % du coût total. Une première livraison de résultats sera faite en 2025 à partir de 20 % des données. En 2027, les chercheurs rendront publique une seconde analyse de la moitié des observations, mais il faudra attendre 2030 pour avoir une lecture de l'ensemble des images et spectres collectés.



CEA - AIRBUS - ESA-STEPHANE CORVAJA

Le télescope spatial Euclid (en cours de montage, à droite) emporte un miroir de 1,2 mètre de diamètre (à gauche) qui alimente en lumière deux instruments, VIS pour la lumière visible (en haut, à gauche) et NISP pour le rayonnement infrarouge.

vers dont le ciment gravitationnel est la matière noire. *« Un modèle d'univers avec une densité de matière noire élevée produira plus d'amas que celui avec une densité faible »*, explique Yannick Mellier. L'estimation de la population d'amas et de son évolution au cours du temps nécessite donc de sonder les profondeurs de l'Univers. *« Chaque galaxie a sa propre vitesse,* souligne le chercheur, *une vitesse qui n'est pas aléatoire : les galaxies ont en effet tendance à se diriger vers les structures les plus massives de l'Univers. Elles forment alors des champs de vitesses qui tracent les régions cosmiques où se concentre la gravité. »* Là encore, les vitesses de déplacement de toutes les pièces de l'échiquier seront autant de sources d'information à même d'élucider le mystère de l'énergie noire. Ces deux voies d'investigation ont toutefois nécessité de déployer des trésors d'ingéniosité technologique. *« Enregistrer les très fins écarts de forme des galaxies provoqués par la matière noire exige une qualité d'image stable au cours du temps,* note David Elbaz. *La même image prise à deux ou six ans de distance doit être semblable, à la molécule près ! »* Cette ultra-haute précision permettra à chaque pose d'observer les déformations gravitationnelles de 50 000 à 100 000 galaxies. L'instrument NISP, dédié à la lumière infrarouge, opère quant à lui à une température de -170 °C, ce qui lui permet de déceler toutes les sources de chaleur de son champ de vision. L'un des grands défis de la mission était de lui assurer une très grande stabilité de mesure, en dépit du rayonnement cosmique qui le bombarde et le vieillit en permanence. *« Cette stabilité a permis de planifier, à l'aide de logiciels, les relevés à la seconde près, et ce pendant six ans »*, s'enthousiasme Jean-Charles Cuillandre, astronome au CEA. NISP va ainsi permettre d'étudier le décalage vers le rouge de la lumière des astres, le pendant de l'effet Doppler pour le son. À l'approche d'une ambulance, les ondes sonores de sa sirène sont resserrées, comme écrasées à l'avant du véhicule et le son paraît plus aigu à l'observateur. À l'inverse, tandis que l'ambulance s'éloigne, les ondes s'étirent dans

DEVIPRIDE

« Euclid va observer chaque semaine l'équivalent de la totalité du ciel couvert par le télescope Hubble en trente ans »

David Elbaz, directeur scientifique du département d'astrophysique du CEA, à Saclay

le sillage du véhicule et le son devient plus grave. Le même phénomène se produit pour la lumière : celle d'un astre est perçue plus bleue à l'approche et plus rouge lorsqu'il s'éloigne. Le décalage vers le rouge des galaxies va permettre à Euclid de mesurer précisément leur distance et dresser la carte la plus étendue dans l'espace et le temps jamais réalisée. Le décalage vers le rouge est de fait l'un des marqueurs essentiels de l'énergie noire.

Pour pouvoir balayer l'énorme portion de ciel auquel il est dédié, *« Euclid est doté d'un large champ de vision, qui couvre à peu près la surface de trois pleines lunes,* explique David Elbaz. *Par comparaison, celui du télescope spatial Hubble équivaut à la pointe d'un stylo porté à bout de bras et celui du James-Webb à la vision au travers du chas d'une aiguille. Au cours de sa mission, Euclid va observer chaque semaine l'équivalent de la totalité du ciel couvert par le télescope Hubble en trente ans. Cela prendrait neuf cents ans à Hubble pour assurer le même résultat ! »* Une telle moisson d'images et de spectres va permettre des comparaisons statistiques entre les tranches d'univers, pour comprendre où et comment l'Univers accélère son expansion. Et en savoir plus sur l'évolution dans le temps de la prise de pouvoir de l'énergie noire sur le destin de celui-ci.

Des images d'une précision sans précédent

Le 7 novembre 2023, l'ESA a publié les cinq premières images issues des premiers tests instrumentaux d'Euclid. Elles ont démontré l'excellence de l'observatoire, par sa précision, ses largeur et profondeur de vue inédites ! Au-delà des objectifs principaux, ces clichés annoncent un bouleversement scientifique pour de nombreux autres champs de recherche. *« Euclid est un joli filet que l'on lance à la lumière et qui, sur une fraction et une profondeur du ciel plus grandes que ce qui a jamais été exploré, attrape tout sur son passage,* note Jean-Charles Cuillandre *: aussi bien des étoiles, des planètes flottantes, des galaxies proches, que la lumière interstellaire ou des quasars lointains. »*

ESA/EUCLID/EUCLID CONSORTIUM/NASA. IMAGE PROCESSING BY J.-C. CUILLANDRE (CEA PARIS-SACLAY), G. ANSELMI

Ce cliché de la nébuleuse de la Tête de cheval a été pris en seulement une heure par Euclid ! Il combine des longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge.

Particulièrement impressionnante, l'image de l'amas de Persée distingue avec une précision sans précédent les 1000 galaxies de l'amas et plus de 100 000 galaxies supplémentaires en arrière-plan. Un grand nombre d'entre elles, de faible luminosité ou distantes de 10 milliards d'années-lumière, n'avaient encore jamais été observées. Situé à 240 millions d'années-lumière, cet amas est l'une des structures les plus massives connues. Il ne peut s'être formé et demeurer gravitationnellement stable qu'en intégrant une grande composante de matière noire. Persée est probablement à l'intersection de filaments cosmiques de matière noire. Plus de la moitié des galaxies d'arrière-plan seront utilisées pour analyser les effets de lentilles gravitationnelles faibles.

« Les quatre autres clichés illustrent les différentes échelles qui vont pouvoir être explorées par Euclid », indique Jean-Charles Cuillandre, artisan de cette première livraison d'images. Le chercheur est particulièrement admiratif du portrait d'une galaxie spirale, IC-342, *« une image remarquable, qui est à mon sens la plus précise jamais prise en astronomie d'une galaxie dans son intégralité. Cet observatoire spatial va fournir une moisson de données avec un potentiel de découvertes considérable. Je pense qu'on parlera encore des résultats d'Euclid dans quarante ans. »*

Yannick Mellier s'enthousiasme quant à lui des performances extraordinaires de l'instrument en infrarouge qui *« va fournir à la communauté astronomique des données qui correspondent à peu près à 12 milliards de sources en visible et en infrarouge. C'est extraordinaire ! »* La publication du relevé total ne sera cependant faite qu'au début de la prochaine décennie, qui promet ainsi de revoir de fond en comble notre vision du cosmos, et peut-être de rebattre les cartes de la physique pour aller au-delà de la vision d'Einstein. Et enfin comprendre la nature de l'énergie noire ! ■ **S. R.**

NATHALIE PALANQUE-DELABROUILLE
COSMOLOGISTE, PORTE-PAROLE DE LA MISSION DESI

« Notre objectif est de recueillir la lumière de 40 millions de galaxies »

La cosmologiste détaille le fonctionnement de l'instrument DESI, qui pourrait apporter un nouvel éclairage sur la nature de l'énergie noire. Les résultats de la première année d'observations seront connus début avril.

DESI, Euclid, Vera-Rubin : trois instruments se mettent sur la piste de l'énergie noire, c'est un effort sans précédent en cosmologie...

Oui, notre discipline vit une époque formidable ! DESI (Dark Energy Spectroscopic) a débuté ses mesures à l'observatoire de Kitt Peak, en Arizona (États-Unis), en mai 2021. Le télescope spatial Euclid a pris son envol en juillet 2023. Il entre dans sa phase d'acquisition des données *(lire p. 32)*. Le télescope de grande taille Vera-Rubin, au Chili, devrait entrer en fonction en 2025… Ces instruments sont les premiers spécifiquement conçus pour étudier l'énergie noire, ainsi que la matière noire.

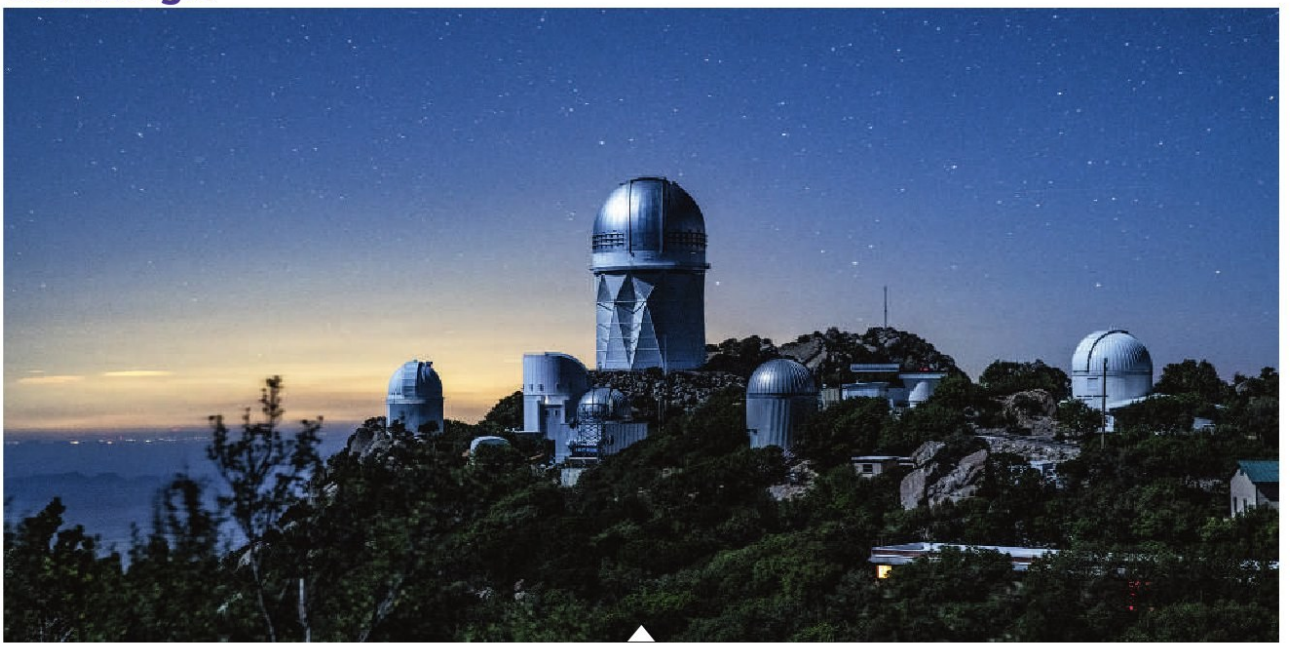
DESI a une longueur d'avance. Les premiers résultats ont été publiés en juin 2023. Que disent-ils ?

Que DESI fonctionne parfaitement bien, ce qui n'était pas évident car nous n'avons pas été épargnés par les aléas. Il y a eu les retards dus à la crise du Covid en 2020. En juin 2022, un feu de forêt a menacé l'observatoire de Kitt Peak et recouvert de cendres nos installations. Enfin, en août 2023, le NOIRLab (National Optical-Infrared Astronomy Research Laboratory) a été victime d'une cyberattaque qui a mis hors service le télescope Gemini North, à Hawaii. Par précaution, nous nous sommes déconnectés du réseau. Nous avons toutefois surmonté chacun de ces obstacles… Les résultats publiés en juin ont servi à valider l'instrument et notre méthode. Le plan focal [où se forme l'image de l'astre] de DESI est doté de 5000 fibres optiques capables d'obtenir presque autant de spectres [décomposition de la lumière en ses différentes composantes, ou « couleurs »] d'un coup. L'objectif est de recueillir la signature lumineuse de près de 40 millions de galaxies et de quasars [source de rayonnement intense et quasi ponctuelle associée à un trou noir supermassif au cœur d'une galaxie]. Nous avons procédé à un mini-relevé correspondant à une zone du ciel de 1 % par rapport à ce que pourra faire l'ensemble des observations de DESI, mais comprenant tout de même 2 millions de spectres ! Nous avons constaté que, quelles que soient les sources visées, galaxies ou quasars, nous obtenons rapidement des spectres d'excellente qualité. Depuis, nous sommes entrés dans le relevé global qui nous permet-

S. CASSANAS

BIO EXPRESS

- **1970 :** Naissance à Ermont (Val-d'Oise).
- **1997 :** Doctorat de physique à l'université de Chicago (États-Unis) et l'université Paris 7. Entrée au CEA à Orsay, à l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers.
- **2012 :** Prix du livre d'astronomie pour *Les Nouveaux Messagers du cosmos* (Seuil).
- **2017 :** Prix Irène-Joliot-Curie de la Femme scientifique de l'année.
- **2018 :** Porte-parole de la mission DESI, collaboration de 500 chercheurs appartenant à 75 institutions différentes.
- **2020 :** Élue à l'Académie des sciences.
- **2021 :** Directrice de la division de physique du Lawrence Berkeley National Laboratory (États-Unis).



THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA, LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY

Situé au sein de l'observatoire de Kitt Peak, en Arizona (États-Unis), l'instrument DESI, monté sur le télescope Mayall, permettra de cartographier l'Univers en trois dimensions sur des milliards d'années-lumière.

tra d'apporter un nouvel éclairage sur la nature de l'énergie noire.

De quelle manière DESI va-t-il contribuer à comprendre la nature de l'énergie noire ?

En mesurant son action tout au long de l'histoire de l'Univers. Les 40 millions d'objets cartographiés se situent entre 1 milliard et 12 milliards d'années-lumière de nous. Nous aurons donc accès à la distribution des galaxies sur toute cette tranche temporelle. Or cette distribution n'est pas aléatoire. Les galaxies sont apparues là où initialement il y avait des surdensités de matière dans l'Univers primordial. La distance caractéristique entre ces surdensités n'a ensuite évolué que sous l'effet de l'expansion de l'Univers. La mesurer, c'est avoir accès à l'expansion, et à l'évolution de l'expansion. Plus elle va s'accroître, et plus nous « verrons » l'énergie noire se manifester. Or, les théories sur sa nature conduisent à des prévisions différentes concernant son action au cours du temps *(lire p. 28)*.

Quand publierez-vous les premiers résultats concernant l'énergie noire ?

Notre objectif est de rendre publics les résultats de la première année d'observations de DESI le 4 avril prochain. Cela se fera en simultané lors de deux conférences, l'une organisée par l'American Physical Society à Sacramento, aux États-Unis, et l'autre lors des rencontres de Moriond, en Italie. Nous livrerons des spectres d'une grande précision, répartis entre des cibles proches de nous et certaines situées jusqu'à 12 milliards d'années dans le passé.

Afin de ne pas influencer l'interprétation des résultats, nous avons travaillé jusque-là en floutant une partie des informations. C'est ce que l'on appelle le « blinding » [« aveuglant »]. En effet, DESI ne mesure pas directement une distance en trois dimensions, mais un angle (position 2D sur la voûte céleste) et un décalage vers le rouge (distance vis-à-vis de l'observateur). Pour convertir ces données en distance, nous devons utiliser un « modèle » d'univers [qui dépend de sa courbure et de diverses constantes]. Masquer le modèle permet d'éviter les biais de confirmation dans l'analyse des mesures. Le risque pour les chercheurs étant d'y lire ce qu'ils souhaiteraient y trouver, en fonction de leur théorie…

Quels seront les apports d'Euclid et de Vera-Rubin sur l'énergie noire ?

Les instruments sont complémentaires. Euclid va observer les spectres dans l'infrarouge, qui sont émis par les galaxies les plus lointaines. Cette gamme est inaccessible à DESI car les infrarouges sont bloqués par l'atmosphère. En revanche, Euclid est un télescope moins performant que le Kitt-Peak sur lequel est installé DESI. La résolution des spectres sera moins bonne.

Quant au Vera-Rubin, c'est un immense télescope au sol, plus grand que DESI, dont la grande force est la vitesse de prise de données [le temps de pose est d'environ 30 secondes]. Il va « mitrailler » l'Univers, et s'intéresser ainsi aux phénomènes transitoires, comme les supernovae, ces explosions d'étoiles en fin de vie. Elles ne sont pas si fréquentes. Il faut donc balayer une grande partie du ciel pour les voir, ce que sera capable de faire Vera-Rubin. Aujourd'hui, quelques milliers de supernovae ont été observées. On s'attend à en voir des centaines de milliers. Cela va révolutionner leur étude. Or, c'est grâce aux supernovae de type « Ia » que l'on s'est aperçu de l'accélération de l'expansion de l'Univers… ■

Propos recueillis par F. N.

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

2,5 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

7,3 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

UNE VISION COMPLÈTE DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs sur notre chaîne Twitch https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2,2 millions de fans !

plus de 160 000 followers

plus de 163 000 instagrammeurs

Plus de 7 000 abonnés professionnels

plus de 17 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

« Le Rulpidon », sculpture monumentale signée Ulysse Lacoste, a été installé dans le jardin de la Maison Poincaré, au cœur de l'Institut Henri-Poincaré à Paris. L'œuvre représente une forme géométrique à la fois ronde et carrée, suivant le point de vue d'où on la regarde.

Maison Poincaré

Les mathématiques en partage

Quelques mois après l'ouverture, à Paris, d'un musée dédié aux mathématiques et à leurs applications, « Sciences et Avenir » vous propose une visite guidée en compagnie du biologiste Guillaume Achaz, du mathématicien Antoine Chambert-Loir et du physicien Kirone Mallick. Trois personnalités, trois disciplines, trois rapports aux mathématiques : l'occasion de croiser les regards sur les sciences.

Par Clémentine Laurens. Photos : Cyril Entzmann/Divergence pour Sciences et Avenir-La Recherche

« *Le grand public est très demandeur de vulgarisation scientifique !* » Le physicien Kirone Mallick, chercheur à l'Institut de physique théorique à Saclay, sait de quoi il parle, lui qui s'investit régulièrement dans des activités de médiation scientifique. Pourtant, si la biologie a, par exemple, sa Grande Galerie de l'évolution, ou la physique sa Cité des sciences et de l'industrie, les mathématiques, elles, n'avaient pas le privilège de bénéficier d'un lieu pleinement dédié à leur exposition et leur médiation à Paris. Depuis septembre dernier, l'injustice a été réparée par l'ouverture de la Maison Poincaré, au sein de l'Institut Henri-Poincaré (CNRS, Sorbonne Université), en plein cœur du 5e arrondissement.

Créer du lien : voilà le maître mot de cet endroit. Du lien entre le monde des mathématiques, à la réputation un peu austère, et le grand public. Du lien entre générations, dans un lieu où se croisent des visiteurs de tous âges. Du lien, également, entre les époques — car si ce sont des mathématiques résolument contemporaines qui s'exposent ici, le lieu lui-même est empreint d'histoire, et la scénographie ne manque pas de souligner que la recherche s'inscrit dans une continuité, un héritage. Enfin et surtout, ▸

Dans la salle « Partager », des vitrines renferment des modèles en plâtre et en bois datant du XIXe siècle et représentant diverses formes géométriques.

A. CHAMBERT-LOIR

« On ne montre jamais cette étape d'observation, d'expérimentation, dans la mise en forme finale des résultats de recherche en mathématiques »

Antoine Chambert-Loir, mathématicien, chercheur à l'université Paris Cité

du lien entre les disciplines, car dans ces espaces tout est fait pour montrer combien les mathématiques sont omniprésentes et centrales dans le monde actuel, combien elles font écho aux enjeux des autres champs scientifiques. Ici, on expose des mathématiques vivantes, attrayantes, une discipline en perpétuel mouvement et connectée au reste du monde. Les noms des différentes salles d'exposition donnent d'ailleurs le ton dès qu'on pénètre dans les lieux : « Partager », « Inventer », « Connecter », « Modéliser », « Devenir », « Visualiser »… *« Le choix d'utiliser des verbes qui évoquent différentes façons de faire des maths s'est rapidement imposé à nous »*, raconte le mathématicien Antoine Chambert-Loir, qui a participé à la conception du musée et en est aujourd'hui l'un des ambassadeurs. Même le petit jardin attenant au musée a son nom-verbe : « Respirer ». En son centre, trône une sculpture monumentale, signée Ulysse Lacoste, représentant un « Rulpidon », cette étrange forme géométrique *« à la fois ronde et carrée — suivant le point de vue d'où on*

PROJET

Un musée installé dans un lieu chargé d'histoire

Inaugurée en septembre 2023, la Maison Poincaré occupe 900 mètres carrés en plein cœur de Paris. Le musée est installé dans l'ancien laboratoire de chimie physique de Jean Perrin, lauréat du prix Nobel de physique en 1926, qui, en plus de ses travaux scientifiques majeurs, a contribué à la création du CNRS et du palais de la Découverte. Le projet a été impulsé par Cédric Villani lorsqu'il était directeur de l'IHP, mais c'est sous la houlette de Sylvie Benzoni-Gavage, au printemps 2018, que l'idée commence à se concrétiser. Des groupes de travail sont constitués, et chaque équipe commence à réfléchir à la conception de l'un des sept espaces d'exposition. Mathématiciennes et mathématiciens travaillent main dans la main avec la scénographe Céline Nadal pour choisir les sujets à mettre en avant et la manière de les exposer. *« On ne voulait pas tomber dans le tout didactique, le tout pédagogique »*, se souvient Sylvie Benzoni-Gavage. Pari réussi : la mise en scène, lumineuse, chaleureuse et lisible, souligne avantageusement la combinaison entre espaces modernes et espaces patrimoniaux, dans ce lieu chargé d'histoire et pourtant tellement ancré dans la modernité.

D. TOUZEAU/CEA

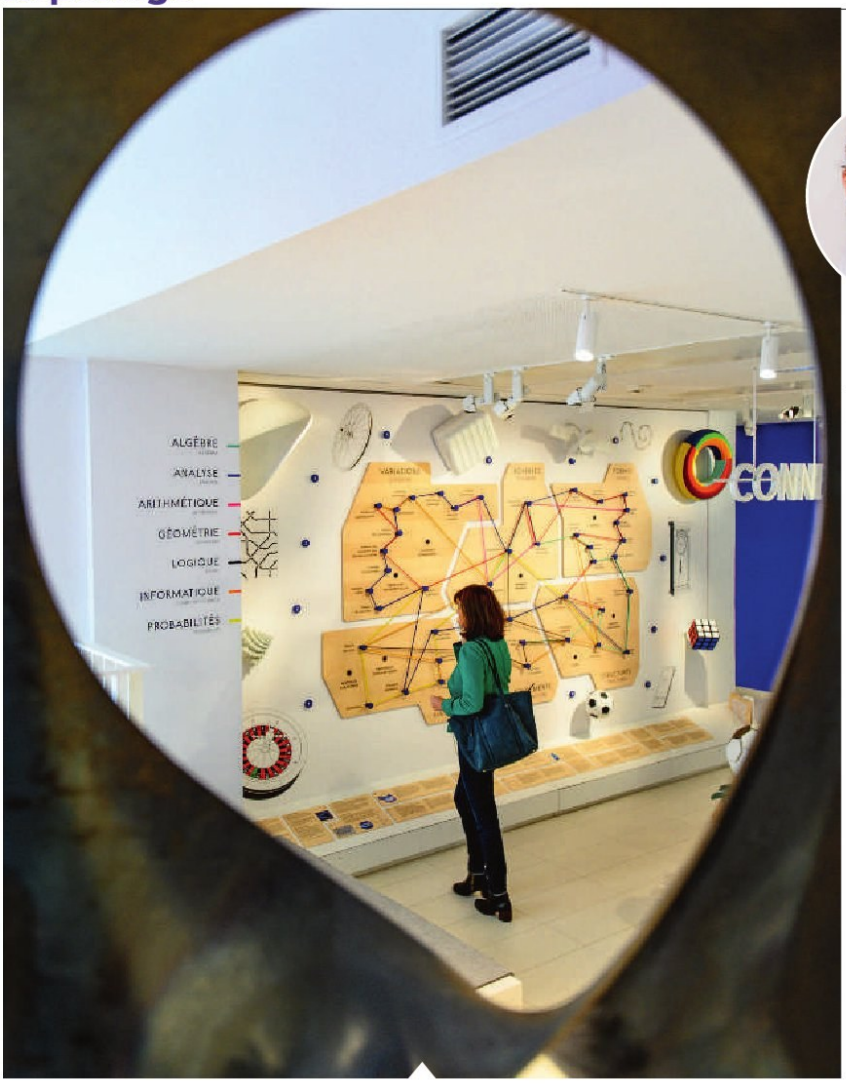
Dans la salle « Modéliser » s'exposent différents dispositifs permettant d'appréhender l'importance des mathématiques dans bien d'autres disciplines.

la regarde », symbole de l'Institut Henri-Poincaré (IHP), dont Antoine Chambert-Loir aime demander avec malice : « *Combien a-t-elle de trous ?* »
Quand on déambule dans la Maison Poincaré, on rencontre bien sûr un certain nombre de totems, d'emblèmes des mathématiques. Mais le musée évite les poncifs du genre : ici, pas de salle intégralement dédiée aux fractales ou au nombre pi. Les totems choisis sont plus subtils, et plus proches de la réalité des maths. Peut-être aussi moins parlants pour le public non connaisseur : dans les couloirs, on entend davantage les visiteurs parler du théorème des quatre couleurs que de celui de Pythagore. Pour des novices, « *c'est un musée difficile à voir sans médiation* », reconnaît Antoine Chambert-Loir. Mais c'est l'enjeu — et l'intérêt — de ce lieu, qui fait le pari de montrer les maths telles qu'elles sont, et non telles qu'on peut facilement les fantasmer. On y croise ainsi des références à l'un des plus grands best-sellers de l'histoire des mathématiques : *Les Éléments* d'Euclide. Le mathématicien assure : « *J'aime ce livre pour la structure qu'il a, cet enchaînement d'énoncés et de démonstrations. C'est lui qui a donné aux mathématiques leur forme actuelle !* » Guillaume Achaz, biologiste de l'évolution et chercheur au Collège de France, réagit : « *En biologie, on ne structure pas du tout les raisonnements de la même manière, on travaille beaucoup plus à partir de l'observation.* »

> « La mathématisation, c'est ce qui a permis de passer de la physique archaïque à la physique moderne »
>
> **Kirone Mallick,** physicien, chercheur à l'Institut de physique théorique, à Saclay

Au croisement des nombreuses disciplines mathématiques

L'observation, pourtant, existe aussi en mathématiques : en témoigne par exemple l'exposition de modèles du XIXe siècle, en plâtre et en bois, représentant des formes géométriques — précurseurs des modèles 3D aujourd'hui produits par ordinateur. Des supports de réflexion pour mathématiciennes et mathématiciens, qui aident à structurer la pensée et pressentir le fonctionnement des choses. « *Simplement, on ne montre jamais cette étape d'observation, d'expérimentation, dans la mise en forme finale des résultats de recherche en mathématiques* », regrette Antoine Chambert-Loir.
Autre œuvre remarquable, exposée dans la salle « Connecter » : un immense plan de métro indiquant comment naviguer dans la mégalopole des mathématiques. On y apprend que pour circuler entre le quartier des « Nombres » et celui des « Formes », on peut par exemple emprunter la ligne joignant la géométrie arithmétique et la théorie de la relativité, ou encore celle reliant la théorie des nombres à la géométrie discrète — cette dernière présentant l'avantage de nous faire passer à côté des « Variétés », monument incontournable du quartier des « Formes ». « *Je suis content de voir que dans cette carte, les mathématiciens ont retenu mon domaine de recherche, la physique statistique !* », sourit Kirone Mallick. Guillaume Achaz, lui aussi, reconnaît des noms qui résonnent familièrement à ses oreilles de biologiste, surtout dans les quartiers des « Aléas » et celui de « Variations ». Mais le physicien et le biologiste s'avouent tous deux plus perplexes devant des quartiers comme les « Fondements » ou les « Structures », qui correspondent à des domaines bien plus éloignés de leur quotidien. « *Moi je ne veux surtout pas choisir entre toutes ces destinations !* », s'exclame Antoine Chambert-Loir. *Mon domaine de recherche, par exemple, c'est la théorie des nombres. Mais mon chemin passe par la géométrie arithmétique, l'analyse complexe, la théorie des groupes, la géométrie tropicale, la géométrie algébrique…* » Du lien, toujours du lien : « *En tout cas, ce que je sais, c'est que pour faire de la biologie, il faut faire des maths, de la physique, de*



Dans la salle « Connecter », un immense « plan de métro » montre comment naviguer dans la mégalopole des mathématiques.

P. IMBERT/COLLÈGE DE FRANCE

« Pour faire de la biologie, il faut faire des maths, de la physique, de la chimie et de l'informatique. C'est une culture générale scientifique indispensable, obligatoire ! »

Guillaume Achaz, biologiste, chercheur au Collège de France, à Paris

la chimie et de l'informatique, énumère Guillaume Achaz. *C'est une culture générale scientifique indispensable, obligatoire!* » Antoine Chambert-Loir abonde : « *J'ai appris les équations différentielles en physique ! Ça a été quelque chose d'important pour moi, ça compte dans la vision que j'ai des mathématiques aujourd'hui.* »

Un musée au cœur d'un centre de recherche très actif

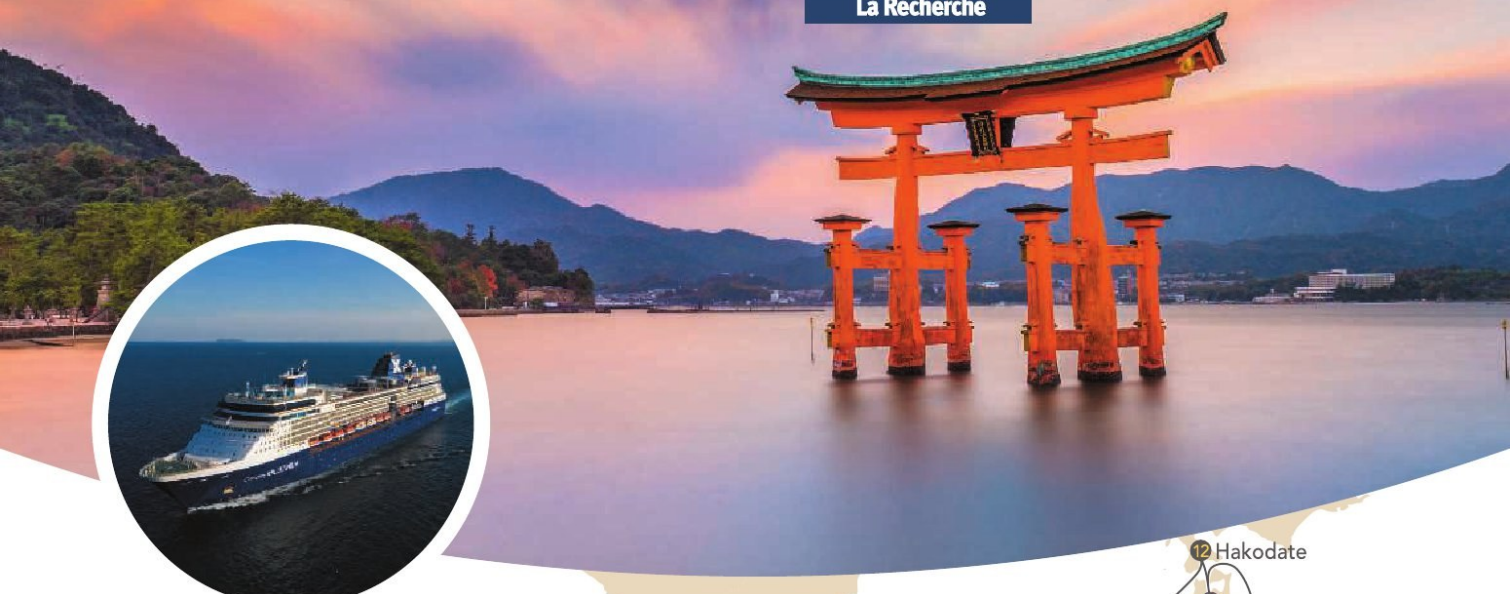
L'importance de croiser les compétences et les sensibilités pour faire de la science se matérialise aussi dans les nombreux portraits et interviews de mathématiciennes et mathématiciens qu'on voit un peu partout, qui témoignent d'une discipline éminemment plurielle… et actuelle. Dans la salle « Devenir », des photos et biographies de chercheurs, chercheuses mais aussi vulgarisateurs et vulgarisatrices alternent avec… des miroirs. Un peu comme si, au fond, les mathématiques sommeillaient en chacun et chacune de nous. « *Une spécificité de ce lieu est aussi qu'il s'agit d'un musée au cœur d'un centre de recherche en mathématiques très actif* », ajoute la mathématicienne Sylvie Benzoni-Gavage, professeure à l'université Lyon 1 et directrice de l'IHP *(lire aussi p. 94)*. Par les fenêtres, on aperçoit d'ailleurs les bureaux du centre de recherche. Et sur le pas de la porte, on croise des mathématiciens et mathématiciennes — des vrai(e)s, en chair et en os — qui vont et viennent sur leur lieu de travail. Au musée des mathématiques, on ne se contente pas de regarder : on manipule aussi. Une sphère magnétique qu'il faut recouvrir de formes aimantées sans laisser d'espace vide, pour appréhender les pavages en trois dimensions, un pendule double qu'on fait tourner, pour comprendre l'importance de faire de la modélisation non déterministe, une grande corde de guitare qu'on tend plus ou moins pour faire varier la fréquence des vibrations et donc le son obtenu… « *On pourrait croire que tout ça, ce ne sont pas des maths,* souligne Antoine Chambert-Loir. *Pourtant, c'est bien ce qui se cache derrière!* » « *C'est toute l'importance de la modélisation,* rebondit Guillaume Achaz : *mettre des notions mathématiques derrière ces observations permet de rationaliser les phénomènes sous-jacents.* » « *La mathématisation, c'est ce qui a permis de passer de la physique archaïque à la physique moderne!* », confirme Kirone Mallick. Qui conclut en citant Galilée : « *Le monde est écrit en langage mathématique.* » ■

CROISIÈRE SCIENCES ET AVENIR

JAPON, ARCHIPEL AUX TRÉSORS

par Voyages d'exception

en partenariat avec SCIENCES ET AVENIR La Recherche



Embarquez pour une croisière unique en partenariat avec **Sciences et Avenir**, à bord du Celebrity Millenium, sur les côtes des îles fascinantes du **Japon**. Vous explorerez les sites incontournables de l'archipel, en compagnie de vos conférenciers **Chantal Forest** et **Emmanuel Le Bret**.

Du 4 au 20 octobre 2024

Dès **6 490 €**/pers.*

depuis Paris - pension complète

*Prix incluant une remise de 500€/pers. pour toute réservation. CGV disponibles sur notre site. Photos : ©Shutterstock, ©Celebrity.

Scannez ce QR code pour télécharger la brochure

Réservations et informations

Tel : 01 75 77 87 48 | contact@voyages-exception.fr

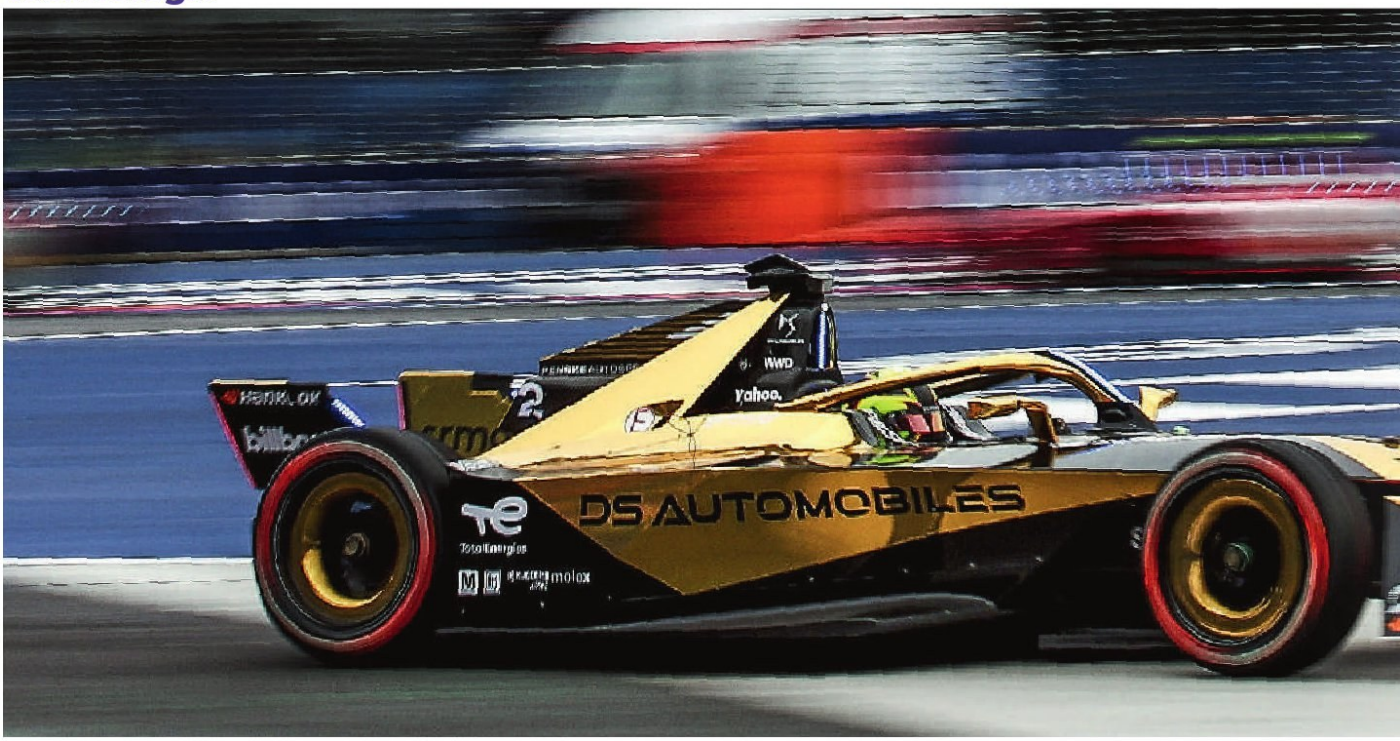
voyages-exception.fr/brochures (code SCJAP) | ou dans votre agence de voyage

WWW.VOYAGES-EXCEPTION.FR

CROISIÈRES FRANCOPHONES

ACCOMPAGNEMENT DEPUIS PARIS

CONFÉRENCIERS DE PRESTIGE



DPPI / PANORAMIC

La course automobile face au virage vert

Alors que les véhicules électriques envahissent les villes, la 10e saison de Formule E tente de faire de l'ombre à la Formule 1, dont le championnat 2024 débute le 2 mars. L'occasion de faire le point sur une décennie d'évolution technologique de ces bolides « verts » joignant hautes performances et faible bilan carbone.

Peut-on concilier compétition automobile et préservation de la planète ? Voici dix ans qu'un championnat de monoplaces électriques tente de prouver que oui. Son slogan : *« Net zéro en carbone depuis le premier jour »*. La 10e saison de Formule E (FE), seul championnat de voitures électriques adoubé par la Fédération internationale de l'automobile (FIA), a démarré le 13 janvier dernier. Une compétition qui est encore loin de rivaliser en matière de popularité avec la Formule 1 (F1), qui vient quant à elle d'entamer sa 75e saison, mais qui ne vise la neutralité carbone qu'à l'horizon 2030, à grand renfort de carburants de synthèse.

L'idée d'une compétition de monoplaces électriques neutre en carbone est née en 2011, lorsque Jean Todt, alors président de la FIA, discute au cours d'un dîner avec l'homme d'affaires espagnol Alejandro Agag. L'ambition était de créer une nouvelle discipline de sport automobile qui sensibiliserait les habitants des grandes villes à l'usage de la voiture

La voiture électrique
DS E-TENSE FE23, lors de la première manche du 10e championnat de Formule E à Mexico (Mexique), en janvier.

Dix ans d'innovations électriques

Génération 1	Génération 2	Génération 3
Puissance		
200 kW (270 chevaux)	250 kW (335 chevaux)	350 kW (470 chevaux)
Capacité de récupération d'énergie		
150 kW	250 kW	350 kW
Énergie récupérée pendant la course		
15 %	25 %	40-50 %
Poids		
900 kg	900 kg	840 kg
Vitesse maximale		
225 km/h	280 km/h	320 km/h

SOURCE : FIA FORMULA E

électrique. Les circuits seraient donc exclusivement urbains. Aujourd'hui, cette volonté revêt une autre dimension : pour accéder aux courses, *« nous ne proposons pas de solution de parking : le seul moyen de venir, ce sont les transports en commun »*, explique Julia Pallé, responsable du développement durable pour la FE. *« C'est nous qui allons à la rencontre des spectateurs plutôt que l'inverse »*, abonde Fred Espinos, ancien responsable de la FIA devenu directeur sportif de l'écurie Abt Cupra.

La première saison eut lieu en 2014-2015, avec dix équipes s'affrontant dans dix villes différentes en Europe, en Asie et sur le continent américain. Mais la technologie était encore balbutiante. Il était impossible alors de mener à bien une course avec une seule charge, et il n'y avait pas de charge rapide pour « faire le plein » pendant l'épreuve, ni moyen de changer rapidement une batterie pesant plus de 300 kg. Aussi, à mi-parcours, les pilotes rentraient au stand pour… changer de voiture, et repartir avec une autre monoplace chargée à bloc. Depuis, les voitures ont progressé, en même temps que les véhicules électriques ont commencé à envahir les rues. *« Quand le championnat de FE a été créé, il y a dix ans, il y avait à peine 300 000 véhicules électriques dans le monde,* rappelle Jeff Dodds, P-DG de la FE nommé en mai 2023. *Faire des courses était une vision du futur. Au début, soyons honnêtes, les voitures étaient assez lentes. Dix ans plus tard, il y a 10 millions de véhicules électriques vendus dans le monde, et ce nombre augmente de 25 % par an. Quant aux monoplaces, elles atteignent 320 km/h et accélèrent de 0 à 100 km/h en 2,7 secondes. »*

En trois générations, les monoplaces électriques se sont métamorphosées *(voir le tableau ci-dessus)*. Fred Espinos résume : *« La première génération a permis de montrer que la voiture électrique existe — en particulier dans des pays où il n'y en avait pas — et que l'on peut faire des courses avec. Avec la deuxième génération, nous sommes passés de deux à une voiture par pilote. La troisième démontre la performance sur des courses longues [environ une heure, soit entre 80 et 90 km]. »* Celle-ci, dite Gen3, est en outre la première à intégrer un train avant chargé de récupérer l'énergie lors des freinages. *« La moitié de l'énergie consommée en course*

PERFORMANCE

L'exceptionnel rendement du moteur électrique

« Une voiture de route à moteur à combustion atteint, quand elle est chaude, un rendement d'à peine 20 % environ, rappelle Sylvain Filippi, directeur de l'écurie Envision Racing. ***Donc, quand vous mettez dix litres d'essence dans le réservoir, il n'y en a que deux qui vont à la roue et les huit autres sont perdus en friction et en chaleur. »*** Le rendement des voitures électriques de route est bien meilleur : à peu près 80 %. ***« Et, avec les voitures engagées aujourd'hui en Formule E, on est à 95-96 % !*** poursuit-il. ***Les pertes dans le moteur, l'onduleur, la transmission ou la suspension ne dépassent pas 4 à 5 %. »*** Pour en arriver là, les motoristes travaillent désormais avec des voltages de 900 V (contre 400 V pour la plupart des voitures électriques de série).

provient de la récupération d'énergie, explique Alessandra Ciliberti, responsable technique auprès de la FIA. *Elle est très puissante pour ralentir la voiture si bien que, sur le train arrière, le freinage hydraulique n'est plus utilisé sauf en cas d'urgence.* » La batterie a perdu une centaine de kilos, pour ne peser « plus que » 284 kg. Prochaine étape : introduire un « plein » en course avec une recharge de 600 kilowatts (kW). *« Nous voulons commencer par recharger 10 % de la batterie en 30 secondes »*, avance Alessandra Cilliberti. L'expérimentation serait imminente, dès cette saison.

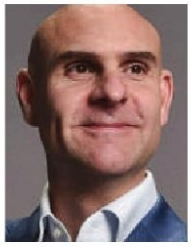
Un laboratoire grandeur nature pour les constructeurs

Comme toute compétition automobile, la Formule E est un laboratoire grandeur nature pour les constructeurs — parmi les 11 écuries engagées cette année, plusieurs grands noms tels que Jaguar, DS, Porsche ou Maserati. *« Si la puissance maximale est la même pour tout le monde, les motoristes se livrent en revanche une guerre au rendement »*, s'enthousiasme Sylvain Filippi, pionnier des courses de voitures électriques et aujourd'hui à la tête de l'écurie Envision Racing, motorisée par Jaguar, sacrée championne du monde en juillet 2023. Schématiquement, la performance des monoplaces électriques repose sur quatre piliers : la batterie, l'onduleur (qui transforme le courant continu de la batterie en courant alternatif pour alimenter le moteur électrique et, à l'inverse, transforme le courant électrique généré durant les phases de freinage par le moteur en courant continu pour recharger la batterie) ; le moteur ; la transmission (qui transfère la puissance aux roues). À quoi il faut ajouter un système efficace de refroidissement.

« Environ 70 % des éléments de la voiture sont communs à toutes les équipes », confirme Jeff Dodds. C'est en particulier le cas de la batterie lithium-ion, d'une capacité de 28 kW développée par Williams Advanced Engineering. Mais aussi du châssis et des freins, ce qui garantit des performances très proches entre les pilotes. *« Les écuries ne peuvent donc modifier qu'environ 30 % des composants pour gagner un avantage sur leurs concurrents »*, poursuit-il.

« Les technologies développées pour augmenter le rendement ou le refroidissement vont être diffusées dans les années qui viennent, prédit Sylvain Filippi. *Il y a sept ou huit ans, pour rouler avec des voltages de 800 volts (V), les pièces n'existaient pas, nous devions tout fabriquer nous-mêmes. Aujourd'hui, des constructeurs comme Volkswagen, Hyundai ou Kia commencent à proposer des chaînes de traction à 800 V qui viennent directement de la FE.* » C'est que, pour un moteur électrique, plus le voltage est élevé, meilleure est l'efficacité *(lire l'encadré p. 47)*. Au-delà de l'aspect mécanique, il y a le volet logiciel qui profite à l'industrie automobile. *« C'est là que peut se faire la différence en course et qui peut être transposée dans la voiture de tous les jours »*, complète Fred Espinos.

Le championnat n'en reste pas moins gourmand en énergie. Pour maintenir son image « verte », l'organisateur s'assure qu'elle est 100 % renouvelable. *« Il faut s'adapter aux contraintes locales,* explique Julia Pallé. *L'idéal est de pouvoir se connecter à un fournisseur qui garantit une électricité d'origine renouvelable. Lorsque ce n'est pas possible, on*



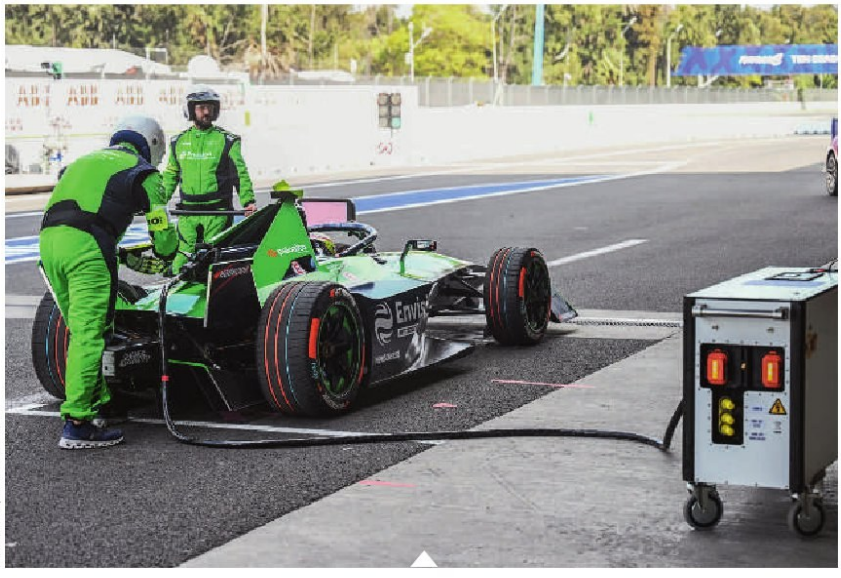
FIAT FORMULE E

« Nous émettons 30 000 tonnes de carbone par saison. La Formule 1, c'est 250 000 tonnes »

Jeff Dodds, P-DG de la Formule E

POUR EN SAVOIR PLUS

- L'interview de Jean-Éric Vergne : **sciav.fr/925vergne**
- L'interview de Jeff Dodds : **sciav.fr/925dodds**
- Le rapport de la Formule E sur le développement durable : **sciav.fr/925formulee**



LAT IMAGES/FIA FORMULA E

Recharge de batterie de la Jaguar I-Type 6, de l'écurie Envision Racing, durant la course de Mexico (Mexique) le 12 janvier 2024.

met en œuvre un PPA [Power Purchase Agreement], *un contrat qui permet de réinjecter dans le réseau autant d'énergie renouvelable que nous en consommons de non renouvelable. Et quand cela est impossible, nous alimentons des générateurs avec des biocarburants obtenus à partir de déchets agricoles et d'huiles de cuisson. Enfin, nous testons depuis quelques courses l'acheminement sur le site de la course de vieilles batteries de voitures électriques converties en système de stockage d'énergie, préalablement alimentées avec des énergies renouvelables.* » Ainsi, la Formule E a obtenu la certification ISO 20121 dédiée au développement durable dans l'événementiel. Elle implique également que châssis, pneus, batteries soient tous recyclés.

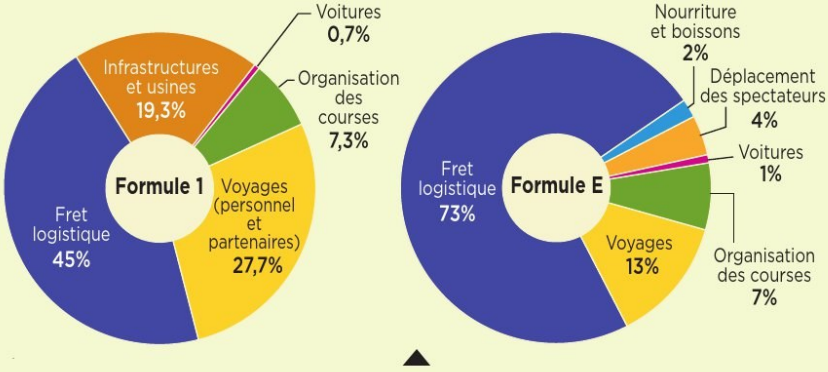
Des émissions carbone en baisse de 24 % en 2023

Même si elle est neutre en carbone, l'organisation du championnat demeure une source d'émissions de gaz à effet de serre. Jeff Dodds ne le cache pas, mais relativise : « *Nous émettons environ 30 000 tonnes de carbone par saison. La Formule 1, c'est 250 000 tonnes, sans les déplacements des spectateurs.* » À titre de comparaison, le Tour de France a émis plus de 216 000 tonnes en 2022 (dont 84 % pour le déplacement des spectateurs), la coupe du monde de rugby 2023 en France 640 000 tonnes et la dernière coupe du monde de football plus de 6 millions de tonnes. Des émissions qui sont compensées « *en investissant dans des projets d'énergies renouvelables validées par les Nations unies dans les pays visités* [en excluant le nucléaire], explique Julia Pallé. *Surtout, d'ici à 2030, nous nous sommes engagés à réduire nos émissions de 45 % par rapport à 2019. Nos principaux leviers sont le transport et l'énergie. Nous travaillons sur la réduction de la masse à acheminer sur chaque course, l'adoption de transports moins polluants — fret maritime, ferroviaire — et sur l'optimisation du calendrier de courses selon leur situation géographique. L'an passé nous avons ainsi diminué nos émissions de 24 %.* »

BILAN COMPARATIF

D'où vient la pollution de la course automobile ?

La Formule 1 est le temple de la course automobile. 24 courses, 20 voitures qui partent avec 100 kg de carburant. Une folie d'émissions de CO_2. Pourtant, selon le bilan des émissions établi en 2019 par la Formule 1, sur les 256 551 tonnes d'équivalent CO_2 ($teqCO_2$) émises, les émissions des monoplaces comptent pour 0,7 %. Le principal poste des émissions vient de la logistique pour acheminer le matériel sur les courses (45 %). Si l'on y ajoute le déplacement du personnel et des partenaires, on arrive à près de trois quarts des émissions. En Formule E, la principale source d'émissions de gaz à effet de serre est aussi le fret (73 %), mais pour « seulement » 24 800 $teqCO_2$. À noter que la Formule 1 ne prend pas en compte le déplacement du public, alors que celui-ci est estimé à 4 % des émissions pour la Formule E. Mais ce public, lui, vient essentiellement en métro.



BRUNO BOURGEOIS - SOURCES : FOM1.FIA - FIA FORMULA E

Les émissions de la F1 et de la FE ayant leurs propres méthodes de calcul, la comparaison est difficile. Ainsi, le bilan de la Formule 1 n'intègre pas les émissions dues aux spectateurs, très faibles pour la Formule E, mais il détaille les émissions des usines.

Sur le circuit, les amateurs de sport automobile y trouvent-ils leur compte ? La finale 2023 à Londres s'est déroulée à guichets fermés. Depuis les tribunes, les premières minutes sont déroutantes. Pas de bruits de moteurs assourdissants, pas d'odeurs d'huile et d'essence. Seuls les sons stridents des moteurs électriques et celui des pneus qui glissent dans les virages. Mais bien vite, l'incertitude des courses fait oublier ce changement de décor. Et pour les pilotes ? Ancien de la F1 avec 58 Grand Prix, double champion du monde de Formule E, Jean-Éric Vergne lance, sincère : « *Le bruit du moteur ? Évidemment que cela me manque ! Mais mon enfant, lui, va venir sur les courses de FE, il va voir de plus en plus de voitures électriques, et les bruits de moteur sont des bruits qu'on ne connaîtra plus. Si les gens ne connaissent pas ce bruit, il ne pourra pas leur manquer.* » Et une fois au volant, peu importe le flacon. L'ivresse reste de gagner la course. Même sans pétrole. ■

Mathieu Nowak

ANTOINE MOREAU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

La délicate collaboration humain-machine

Les outils basés sur l'apprentissage automatique ont l'inconvénient d'impressionner leurs utilisateurs humains. Ceux-ci acceptent trop facilement les résultats fournis, même quand ils sont faux.

Melu est un agent conversationnel pour des gens souffrant de problèmes de santé mentale. Deux groupes d'utilisateurs ont été invités à le tester avant d'éventuellement le recommander à un ami. Dans le premier, 88 % l'ont trouvé très bienveillant. Mais dans l'autre, cette part tombe à 44 %, et un quart le juge manipulateur. Le chatbot était pourtant strictement le même (en l'occurrence GPT3). L'explication se situe en amont du test : à certaines personnes, les expérimentateurs ont dit que l'outil allait se montrer plein d'empathie et chercher à les aider ; les autres avaient été prévenues qu'il était conçu pour vanter un service payant.

88 %
des participants d'une étude jugent un chatbot bienveillant quand l'outil leur est présenté comme tel. Contre 44 % pour ceux à qui on a dit qu'il était manipulateur.

C'est le scénario d'une étude de chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT, États-Unis). Parue en octobre 2023, elle révèle qu'une intelligence artificielle (IA) peut être biaisée par la perception qu'en a son utilisateur, indépendamment de l'efficacité réelle de l'outil. En 2021, déjà, trois chercheurs en gestion des systèmes d'information de l'université de Géorgie (États-Unis), montraient à quel point des personnes étaient prêtes à réfuter leurs propres intuitions si une IA proposait une autre réponse. Après avoir demandé à des par-

H. MATUTE

> « Les participants ont non seulement reproduit les biais de l'intelligence artificielle mais ils les ont aussi acquis »
>
> **Helena Matute,** chercheuse en psychologie à l'université de Deusto, à Bilbao (Espagne)

ticipants d'évaluer le nombre de personnes sur des photos de groupe, les chercheurs leur ont soumis deux estimations : celle d'un algorithme et une moyenne d'estimations données par 5000 autres personnes. L'une comme l'autre étant des fictions pour les besoins de l'étude, mais les participants l'ignoraient. Ces derniers pouvaient alors maintenir leur intuition initiale ou s'en remettre à l'une des deux suggestions. Dans toutes les variantes de l'expérience, les participants ont eu une nette tendance à privilégier les réponses du soi-disant algorithme, au détriment de leur propre jugement comme de celui d'autres personnes. Et ce, même si le chiffre suggéré était outrageusement faux, l'algorithme surévaluant dans certains cas de 100 % le nombre de personnes, alors que leur propre réponse était proche du bon chiffre. Pour les chercheurs, ces résultats témoignent d'une confiance, sinon aveugle, du moins excessive envers des technologies dans le cadre de problèmes difficiles à résoudre.

POUR EN SAVOIR PLUS

L'étude du MIT (en anglais) : **sciav.fr/925biais**

Ce rapport humain-IA apparaît plus retors encore dans un article de deux chercheuses en psychologie de l'université de Deusto, à Bilbao (Espagne), publié en octobre 2023. Des étudiants devaient identifier sur des images médicales quels échantillons de tissus étaient atteints d'une maladie (fictive). Pas besoin de compétences en médecine, la tâche était très simple, reposant sur les proportions de deux couleurs de cellules, l'une d'elles indiquant la pathologie. Un groupe était assisté par une IA, l'autre non. Or, pour 20 % des échantillons, la prédiction de l'IA était fausse de manière évidente. Ce qui n'a pas empêché, là aussi, les étudiants concernés de la suivre, quand les autres, non assistés, donnaient davantage de bonnes réponses. Deuxième phase de l'expérience, avec les mêmes étudiants formant cette fois un unique groupe, sans aucun usage de l'IA. Le résultat est encore plus perturbant : les étudiants qui avaient été exposés auparavant aux prédictions de l'IA ont continué à reproduire ses erreurs ! « *Cela nous a surpris, même si c'est ce que nous cherchions à voir,* admet Helena Matute, qui a mené ce travail avec Lucia Vicente. *Les participants ont non seulement reproduit les biais de l'IA mais les ont aussi acquis. Notre expérience montre qu'une IA a la capacité de transmettre ses biais aux décisions humaines.* »

Un rôle persuasif qui peut avoir des effets graves

Prudence toutefois. Ce résultat étant assez nouveau, il appelle à des études plus poussées tant il est préoccupant. « *Ce rôle persuasif de l'IA est susceptible d'être modulé par des facteurs multiples et variés* », explique Lucia Vicente. Le contexte médical de l'expérience montre néanmoins les répercussions possiblement graves de ce phénomène, et les chercheuses envisagent de l'adapter à d'autres situations : décision politique, rencontres en ligne, analyse scientifique de cas… C'est toute la notion de collaboration humain-machine qui est ici en jeu. « *Doit-on demander aux humains d'être aptes à repérer les erreurs dans les décisions d'une IA ou une IA doit-elle servir à détecter de potentielles erreurs d'une décision humaine ?* », avance Helena Matute. Les réponses seront en tout cas bien moins techniques qu'un paramétrage d'algorithme. ■ **Arnaud Devillard**

LE MOT DU MOIS

Prédiction

Le résultat fourni par un outil d'intelligence artificielle pour une tâche donnée est souvent appelé « prédiction » dans les articles de recherche. Le terme peut être pris au sens propre dans certains cas (diagnostic médical, maintenance prédictive en usine, météo…). Plus généralement, il concerne les algorithmes d'IA statistique qui tirent des règles et des corrélations à partir de jeux de données. Leur réponse n'apporte pas une certitude absolue mais un score de probabilité : un outil de reconnaissance faciale donnera un pourcentage de ressemblance entre deux visages ou entre un visage et une identité. Cela n'empêche pas l'outil d'être globalement fiable mais il ne peut servir, par définition, que d'aide à la décision. Le danger est d'en faire une figure d'autorité.

V. JONCHERAY/ANDIA.FR

La France compte rattraper son retard dans le secteur de l'éolien « offshore » grâce à la technologie flottante, qui permet une montée en puissance de la production électrique (ici, l'éolienne flottante Floatgen en 2018 au large du Croisic, en Loire-Atlantique).

Éolien en mer

L'aube des géants flottants

Dans la course à l'énergie renouvelable, l'éolien « offshore » pourrait bien occuper une place non négligeable. L'État a lancé un appel d'offres pour la concession de trois parcs au large de nos côtes. Reste à tester les différentes solutions techniques proposées par les sociétés candidates.

Par Loïc Chauveau

C'est l'année de l'éolien flottant. Au cours de ce printemps, le gouvernement français va dévoiler les lauréats du premier appel d'offres au monde pour la concession de trois parcs d'éoliennes *offshore* qui ne sont pas fixées au sol par des pylônes et des fondations en béton. Il y en aura deux en Méditerranée et un en Bretagne Sud, d'une puissance de 250 mégawatts (MW) chacun, pour un investissement privé, mais aidé par l'État, de 600 à 700 millions d'euros. Pour ce secteur industriel naissant, et dans l'attente d'autres concours à venir en Écosse, aux États-Unis et au Japon, l'initiative française est la première occasion de confronter des solutions techniques qui n'ont pas encore été éprouvées dans les conditions réelles de mer autrement qu'avec des prototypes. D'ici à 2030, ce sera chose faite.

Ce nouveau secteur énergétique a de bonnes raisons d'émerger. « *L'éolien* offshore *posé sur le fond marin ne peut pas être déployé au-delà de 50 mètres de profondeur ; il est donc condamné à rester près des côtes,* rappelle Ken Ilacqua, responsable des projets éoliens en mer chez Océole, société de développement d'énergies renouvelables *offshore. Avec le flottant, on va plus loin en mer, là où les vents sont plus forts et réguliers donc plus productifs, et où les conflits d'usage et de paysage sont atténués.* » Bien des avantages, mais au prix de difficultés techniques inhérentes à l'installation et à l'entretien de machines éloignées des côtes et ballottées par le vent et la houle.

Le point de départ de cette aventure se situe en 2009. Cette année-là, la société pétrolière norvégienne Statoil (qui deviendra Equinor en 2018) installe au large de la Norvège une tour cylindrique de 65 mètres de haut sur laquelle est juchée une éolienne de 40 mètres d'une puissance de 2,3 MW. Toujours en activité, cette machine appelée Hywind est le premier pilote grandeur nature mis à l'eau. Quinze ans plus tard, force est de constater qu'il a eu peu de successeurs. Aujourd'hui repris par Equinor et Masdar, le fonds des Émirats arabes unis, le projet est devenu un parc de cinq éoliennes situées au large de la côte est de l'Écosse. Cette ferme pilote de 30 MW est à ce jour la seule existante au monde — bien inférieure aux 250 MW des appels d'offres français.

Au-delà de ce projet à 200 millions d'euros, les prototypes sont rares. Depuis 2018, la société française Ideol teste sa barge en béton Floatgen sur le site d'expérimentation SEM-REV de l'École centrale de Nantes, situé au large du Croisic (Loire-Atlantique). Cette seule unité de 2 MW fournit de l'électricité pour 5000 personnes 66 % du temps — ce qui, pour une énergie intermittente, est remarquable. Sur le même site, la société brestoise Eolink a installé en 2023 son prototype de 5 MW. L'an dernier également, le bureau espagnol d'ingénierie Saitec a mis à l'eau son éolienne Sath de 2 MW dans une zone d'essai à 3 kilomètres au large d'Armintza, au Pays basque espagnol. En 2021, Shell, Tepco et l'électricien allemand RWE ont installé leur prototype TetraSpar au large de la Norvège. Enfin, on attend pour cette année la mise à l'eau des trois éoliennes de type Windfloat, de l'entreprise franco-américaine Principle Power, à 16 kilomètres au large de Leucate (Aude).

Les pionniers sont donc européens, et encore émergents. Tous ont répondu à l'appel d'offres français Avec des solutions techniques différentes pour stabiliser leurs éoliennes. Laquelle s'imposera? Trop tôt pour le dire, le secteur manque de retour d'expériences. Pourtant, les concepteurs ne partent pas de rien. Cer-

Les trois parcs d'éoliennes flottantes prévus pour 2030 auront une puissance de 250 mégawatts chacun.

Les principales éoliennes sur la ligne de départ

Revue de détail de 6 concurrents parmi bien d'autres ayant un même objectif : installer des éoliennes de 15 MW en Bretagne et en Méditerranée (les échelles ne sont pas respectées).

WINDFLOAT
(Principle Power, États-Unis) - Portugal, France, Écosse

Testé entre 2011 et 2016, ce flotteur comporte 3 colonnes cylindriques de 25 m de hauteur reliées par des tubes de 70 m de long. La colonne la plus large accueille l'éolienne, les deux autres assurent la stabilité grâce à des ballasts actifs qui répartissent l'eau entre les 3 colonnes pour compenser les variations du vent exploité par la turbine.

HYWIND
(Equinor, Norvège; Masdar, Abu Dhabi) - Écosse

Les 5 éoliennes du parc écossais sont sur une zone de 100 m de fond, sur 4 km² d'océan. Leur hauteur maximale est de 253 m, dont 78 m sous l'eau, pour un diamètre des pâles de 154 m, soit des pâles de 76 m seulement. Elles sont ancrées au sol par 3 câbles d'acier. Sur cette zone écossaise, la hauteur moyenne de la houle est de 1,8 m.

INFOGRAPHIES: BRUNO BOURGEOIS

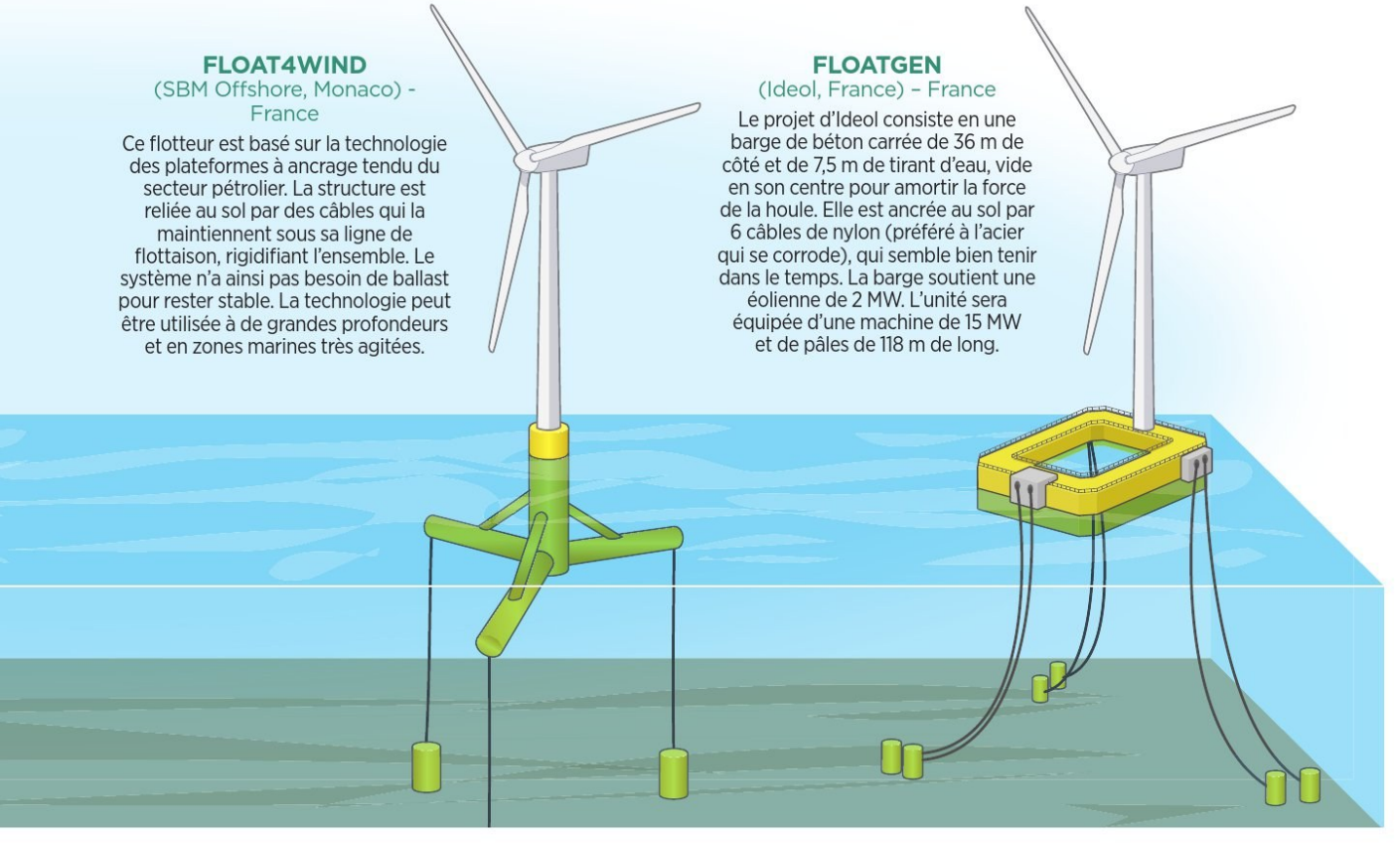
OCÉOLE

« Avec le flottant, on va plus loin en mer, là où les vents sont plus productifs et où les conflits d'usage et de paysage sont atténués »

Ken Ilacqua, responsable des projets éoliens en mer chez Océole

tains acteurs de la construction des plateformes pétrolières voient dans l'éolien un moyen de se reconvertir pour l'après-pétrole. Ainsi de SBM Offshore, société monégasque qui propose sa technologie dite de plateforme à ancrage tendu avec le Float4wind. *« Depuis des décennies, notre société est spécialisée dans les systèmes d'ancrage et propose diverses technologies pour les plateformes pétrolières, notamment pour les unités flottantes de production et de stockage de pétrole, les FPSO, des bateaux parmi les plus grands au monde »*, explique ainsi Stéphanie St-Hill, directrice des produits renouvelables chez SBM Offshore. Pour cette société spécialiste des structures plongées dans l'eau de mer et ballottées par la houle, le défi technique est totalement à sa portée. Il s'agit d'adapter ce qu'elle a construit pour les gisements *offshore* avec des contraintes moindres, puisque les fonds ici sont d'une centaine de mètres contre 2000 mètres pour les forages *offshore* les plus profonds. Les travaux de développement portent principalement sur des questions nouvelles comme la prise en compte des contraintes spécifiques exercées sur les lignes d'ancrage et les ancres. Floatgen a affronté des vagues de 11 mètres et a bien supporté les tempêtes Ciaran et Domingos d'octobre 2023. Ses six câbles en nylon — une innovation — ont parfaitement tenu.

Pour les industriels compétiteurs, l'enjeu ne se situe donc pas dans la solidité des éoliennes, mais dans leur capacité à construire en chaîne des dizaines de machines. Deux voies s'opposent, bien illustrées par les projets Hywind et Ideol. La structure cylindrique d'Hywind impose que l'éolienne soit assujettie à son pied au port. Cet ensemble, qui dépasse les 90 mètres de long, est acheminé horizontalement sur la zone du parc où il prend sa posture verticale. Il faut donc à terre une infrastructure dédiée. Floatgen (Ideol)



est en revanche une barge flottante dotée d'une éolienne qu'on déplace sur la zone de production, simplement tractée par des remorqueurs puissants. Un quai d'embarquement au pied de l'usine de construction suffit.

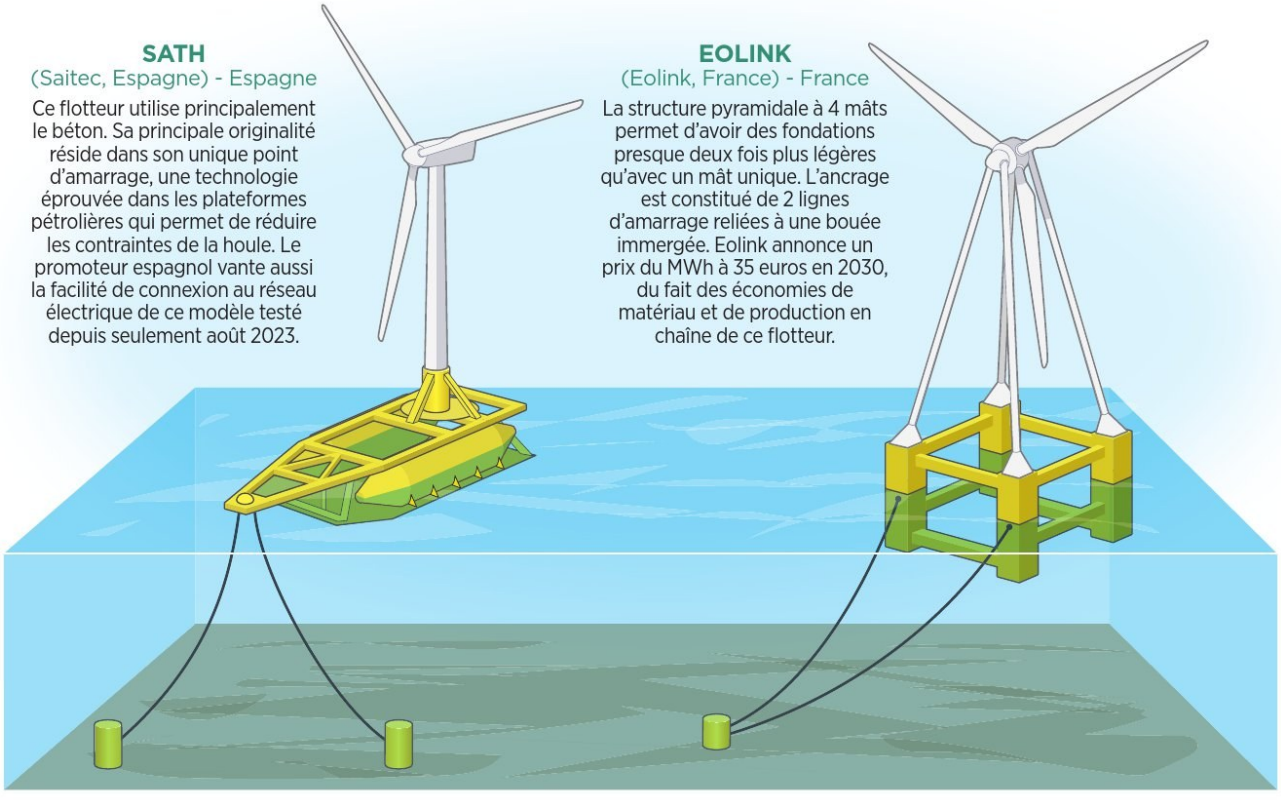
La résistance des machines, un enjeu crucial

« Se profilent aussi des questions de maintenance, ajoute Jean-François Filipot, directeur scientifique du bureau d'ingénierie France Énergies marines (FEM). *Comme on ne sait pas très bien quel comportement auront les éoliennes, leur degré de résistance aux tempêtes, il faut dès à présent penser à optimiser les visites de maintenance pour éviter d'avoir à aller loin en mer pour réparer.* » Aucun ouvrier, aucun ingénieur aujourd'hui dans le monde ne savent comment vont s'opérer les visites de routine et les réparations sur des machines flottantes mouvantes à partir de bateaux qui ne le seront pas moins. Aussi, une grande partie de la rentabilité des parcs tiendra à la fois dans la résistance des machines mais aussi dans une maintenance bien pensée. *« Les parcs industriels vont être dotés de capteurs qui vont bien sûr donner la production électrique en temps réel, mais qui vont aussi surveiller l'usure des principales pièces afin de programmer leur remplacement avant qu'elles ne cèdent »*, poursuit Jean-François Filipot. Pas question, donc, d'intervenir en urgence en cas de casse, les conditions seront trop mauvaises et chaque visite de maintenance — forcément onéreuse — devra être méticuleusement préparée et programmée.
Tous les industriels sur la ligne de départ insistent donc sur la facilité de construction de leurs engins, leur capacité à les produire en chaîne au coût le plus faible et sur la garantie d'une installation en mer aisée et sûre. C'est la clé pour arriver à un coût de départ de 100 euros le mégawattheure (MWh), certes supérieur à l'ensemble des énergies électriques qui oscillent entre 50 et 70 euros. Mais promis à baisser avec l'industrialisation

JEAN-FRANÇOIS FILIPOT

« Des capteurs vont donner la production électrique en temps réel, mais vont aussi surveiller l'usure des principales pièces »

Jean-François Filipot, directeur scientifique du bureau d'ingénierie France Énergies marines



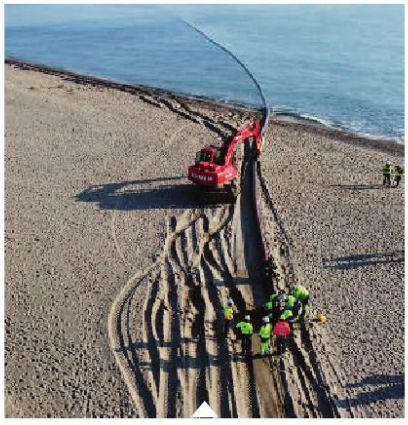
du secteur pour arriver dès 2030 à une parité de coût de production. Une évaluation de deux bureaux d'études pour le compte de l'Ademe, l'agence de la transition écologique, montre que les réductions de coûts sur les turbines par l'augmentation de leur taille et de leur puissance seront le principal moteur de cette baisse des prix.

Des mensurations portuaires impressionnantes

Mais il faudra aussi que les industriels optimisent leurs liens avec les autorités portuaires. À terre, les infrastructures sont en cours de finalisation. Brest et Lorient en Bretagne, Port-la-Nouvelle (Aude) et Fos-sur-Mer en Méditerranée ont déjà construit les terre-pleins où vont être installées les usines de fabrication. L'enjeu est d'importance car, selon l'Ademe, *« pour le flottant, l'assemblage des turbines ne se fait pas en mer mais sur les ports et nécessite des structures adaptées à des machines de plus en plus imposantes.* » Le port de Brest (Finistère) a ainsi construit un polder de 50 hectares pour héberger l'activité posée et flottante. Lorient (Morbihan) devrait être la base de maintenance pour les parcs de Bretagne Sud. De son côté, Port-la-Nouvelle offrira en 2026 un môle dédié d'une surface de 40 hectares, doté de deux quais de 200 mètres de long. Au total, selon le Pacte éolien en mer signé entre l'État et les acteurs de la filière de l'éolien *offshore*, 40 milliards d'euros vont être investis dans les quinze ans à venir avec 20 000 emplois à la clé, dont la moitié pour la construction, un quart pour l'exploitation et la maintenance et le quart restant pour la fabrication des équipements connexes. La filière recherche désespérément des soudeurs et des chaudronniers.

Ces mensurations portuaires impressionnantes ne font que suivre la course à la puissance des éoliennes *offshore*. *« Le secteur n'a en effet pas anticipé le fait que les éoliennes allaient gagner en puissance et donc en hauteur et en longueur de pâles »*, constate Jean-François Filipot. Ces cinq dernières années, les puissances théoriques des turbines sont passées de 12 à 18 MW. En janvier 2023, le constructeur chinois Ming Yang a annoncé un modèle de plus de 18 MW muni de pâles de 140 mètres de long. En 2019, le record appartenait à l'entreprise franco-américaine GE Renewable Energy avec son Haliade-X aux pâles de 107 mètres. Tout va donc très vite. Il faut que les usines et les quais à terre parviennent à suivre. De plus, pour le flottant, la puissance des éoliennes dépend de la taille des flotteurs. Jusqu'où peut-on aller dans la construction de centaines de tonnes de chaînes ou d'ancrages et de barges dépassant la taille de terrains de football ? Reste que cette démesure a une raison. Avec une plus grande taille, on produit plus d'électricité sur des plages de temps plus longues car plus on va haut, plus on trouve des vents réguliers. De plus, diminuer le nombre de mâts réduit les besoins en maintenance. Enfin, à puissance égale, il est plus facile de faire passer auprès des opinions publiques des projets à 30 éoliennes plutôt qu'à 60.

Restent des incertitudes. Ainsi, RTE, le réseau de transport d'électricité français, travaille à résoudre deux questions complexes : les stations de collecte de l'électricité devront être flottantes, ce qui aujourd'hui n'existe pas, les petites unités pilotes étant raccordées par des câbles traditionnels. Or, pour collecter la production de parcs qui devraient atteindre les 3 GW chacun au cours de la prochaine décennie, il faudra innover. *« Il va ainsi falloir définir les composants électriques pour les câbles en courant continu à haute tension en matière de poids, de volume et de sensibilité au mouvement du flotteur, tout en estimant les mouvements et vibrations typiques de la structure »* résume Jean-François Filipot, qui travaille sur ces questions au sein de France Énergies marines. Les attributions des deux parcs français lancent le coup d'envoi d'une véritable aventure. ■



SEBASTIEN XAXA/RTE

Mise à l'eau en 2023 des câbles de raccordement au parc pilote de trois éoliennes flottantes du golfe du Lion, sur la plage du Barcarès (Pyrénées-Orientales).

FAÇADE MARITIME

Les éoliennes au cœur du débat public

Jusqu'au 28 avril, les Français sont invités à participer au débat public intitulé « La mer en débat »*. Il s'agit de recueillir les opinions sur la planification maritime. Où et dans quelles conditions doivent se déployer les activités de pêche, de loisirs, de tourisme, d'énergie ? Quelle place laisser à la biodiversité, et notamment quelles surfaces et dans quelles conditions doit-on préserver l'environnement à travers les parcs naturels marins ? En réalité, ce débat est destiné à trouver une place pour le dernier arrivé : les énergies marines renouvelables. La programmation pluriannuelle de l'énergie fixe en effet comme objectif la création de 50 parcs éoliens *offshore* sur les façades atlantique et méditerranéenne d'ici à 2050. Ce qui impose de leur trouver des emplacements qui respectent à la fois les activités humaines existantes et la biodiversité marine et ornithologique.

• sciav.fr/925mer

La révolution du lait de chamelle

L'ONU a placé l'année 2024 sous le signe des camélidés. Car à l'heure du réchauffement climatique, dromadaires et chameaux produisent un lait très avantageux : moins gourmand en eau, ce type d'élevage pourrait vite devenir compétitif face aux exploitations bovines. Et les qualités nutritionnelles de ce breuvage sont reconnues. Reportage à Dubai, au Kazakhstan et à… Maubeuge.

À quelques encablures de la Belgique, Julien Job possède une ferme semblable à toutes celles des environs de Maubeuge (Nord), à un détail près : son cheptel. Composé de 80 dromadaires et chameaux, ce troupeau exotique détonne dans le paysage verdoyant. Il va pourtant falloir s'y habituer, comme le suggère l'Organisation des Nations unies, qui a consacré 2024 année des camélidés. L'engouement pour le lait de chamelle est désormais patent. Le marché mondial, évalué en 2019 à 10 milliards de dollars (environ 9,3 milliards d'euros) devrait dépasser les 18 milliards (environ 16,7 milliards d'euros) à l'horizon 2027, soit une croissance de 6,8 % par an. Si l'Arabie saoudite reste le premier marché mondial avec une consommation de 33 litres par habitant et par an, la croissance sur la période devrait se déplacer en Occident, notamment en Amérique du Nord. L'Europe n'est pas en reste : l'Allemagne, la France et le Royaume-Uni sont les marchés les plus dynamiques, les achats se faisant le plus souvent par Internet. L'implantation de fermes laitières en France pourrait donc connaître un bel essor, favorisé par le réchauffement climatique. C'est que dans un élevage bédouin (c'est-à-dire dans un pays aride en élevage extensif), il faut neuf fois moins d'eau pour faire un litre de lait que dans un élevage bovin intensif. Et son goût n'est pas si éloigné de celui du lait de vache ou de brebis, quoiqu'un peu plus salé.

Un lait réputé très digeste et qui provoque moins d'allergies

Présent au Salon de l'agriculture depuis 2018, Julien Job est actuellement le seul éleveur français à avoir obtenu (en 2022) l'agrément européen pour commercialiser son lait auprès des consommateurs — essentiellement des populations d'origine maghrébine et des familles friandes d'aliments « bien-être ». Son prix, 17 euros le litre, ne le met pas à portée de toutes les bourses. Plusieurs raisons à cela : une chamelle ne donne du lait qu'une année sur deux et sa production moyenne est de 5 litres par jour, très loin des 30 litres quotidiens d'une vache. Pour Julien Job, les bienfaits diététiques porteront le développement du marché. Le lait de chamelle est réputé très digeste car ses globules gras — des gouttelettes de matière grasse en suspension — sont de taille nettement inférieure à ceux du lait de vache. Par ailleurs, les intolérants au lactose le supportent mieux que le lait de vache, bien que les teneurs en lactose soient comparables. Enfin, le lait de chamelle provoque beaucoup moins d'allergies car il ne contient pas la principale protéine en cause, la bêta-lactoglobuline. Il est également intéressant d'un point de vue nutritif. Riche en vitamine D, il renferme trois à cinq fois plus de vita-

La ferme d'Al Ain, à 100 km de Dubai, est forte d'un cheptel de 3000 têtes. Sa salle de traite automatique peut accueillir jusqu'à 24 chamelles (à gauche). Le Dr Lulu Skidmore, directrice scientifique du Centre de reproduction des camélidés de Dubai (au centre, ci-dessus), est célèbre pour avoir croisé un lama et un chameau, obtenant un hybride stérile : le cama. La compagnie Al Nassma, installée près de Dubai, produit du chocolat à base de lait de chamelle (en bas).

mine C que le lait de vache. Sa bonne teneur en fer en fait un traitement d'appoint en cas d'anémie. Globalement, la composition de ce lait, assez proche du lait humain, en fait un bon substitut au lait maternel.

Mais ce breuvage aurait également des vertus thérapeutiques qui doivent encore être confirmées par des études cliniques à grande échelle. « *Les consommateurs de lait de chamelle ont des besoins en insuline qui baissent. Des observations* in vitro *et* in vivo *laissent penser qu'il agit sur le diabète* », estime le vétérinaire Bernard Faye, spécialiste mondialement reconnu du chameau. Il permettrait chez les diabétiques une meilleure régulation de la glycémie en stimulant la sécrétion d'insuline par les cellules du pancréas ; à moins qu'il ne contienne une protéine ayant une structure proche de l'insuline…

À l'heure actuelle, l'élevage de chameaux reste expérimental sous nos latitudes. Les vertes prairies du nord de la France constituent une alimentation trop riche pour des animaux habitués à ingérer des végétaux très ligneux. La ration doit être adaptée, de même que la salle de traite. En effet, peu de chamelles sont habituées aux trayeuses automatiques et la présence du chamelon à proximité est souvent nécessaire à la descente du lait. D'où une productivité encore faible. Pour l'augmenter, les éleveurs devront se procurer des reproducteurs de qualité. Or,

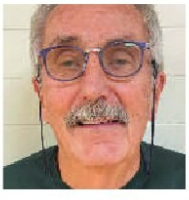
La Camelerie, à proximité de Maubeuge (Nord), est la première ferme française autorisée à distribuer son lait de chamelle auprès des consommateurs. La production moyenne d'une chamelle laitière est comprise entre 3 et 5 litres par jour. La lactation dure en moyenne 12 mois, mais peut s'étaler sur 18 mois.

depuis l'épisode de syndrome respiratoire du Moyen-Orient (Mers-Cov), dû à un coronavirus transmis à l'origine par des dromadaires d'Arabie saoudite en 2012, ils ne peuvent plus importer les animaux en provenance d'Afrique ou d'Asie pour des raisons sanitaires. Les éleveurs ne peuvent s'approvisionner qu'à l'intérieur de l'Union européenne, dans des élevages ou des cirques ou encore des zoos. Un vivier pour le moins limité… Pire, des études menées par les généticiennes Elena Ciani (université de Bari, Italie) et Pamela Burger (université de Vienne, Autriche) semblent démontrer que le degré de consanguinité est élevé pour les chameaux du cheptel européen — tandis que la variabilité génétique est encore acceptable pour les dromadaires.

Dubai, un pôle de recherche de pointe pour le chameau

À l'avenir, pour acquérir de bonnes chamelles laitières, les éleveurs pourraient vouloir se tourner vers les Émirats arabes unis, et Dubai en particulier. Le petit émirat, friand de courses de dromadaires, est en effet en pointe dans la recherche sur cet animal. Et en matière de reproduction, ce qui est valable pour un dromadaire de course l'est également pour une chamelle laitière. À la tête du Centre de reproduction des camélidés, la chercheuse britannique Lulu Skidmore effectue désormais des transferts d'embryons avec un taux de réussite satisfaisant. « *Nous commençons à maîtriser cette technique. Cela permet de démultiplier la descendance des meilleurs chameaux de course sur un laps de temps très court* », explique la biologiste. Pour l'instant, elle n'applique pas les nouvelles technologies de la reproduction aux chamelles laitières, mais rien ne l'empêchera de pratiquer cette forme de sélection lorsque la demande sera là. Par ailleurs, ses travaux sur la congélation du sperme laissent espérer une prochaine application commerciale. Pour l'heure, la fertilité des paillettes (unités de stockage du sperme congelé) n'est pas suffisamment fiable car la forte viscosité de la semence, variable d'un individu à l'autre, rend la congélation difficile. Mais une fois cet obstacle surmonté, les paillettes pourront être exportées bien plus facilement que des mâles sur pied. Les Émirats seront alors en mesure de fournir au reste du monde la semence de leurs meilleurs reproducteurs.

Dubai ne se contente pas d'être un pôle de recherche sur le chameau. L'Émirat abrite également plusieurs fermes XXL comme Camelicious, la plus grosse unité de production laitière au monde. On y



« Nous souhaitons atteindre une production de 15 litres par jour et par femelle »

Ulrich Wernery, conseiller scientifique de Camelicious

dénombre plus de 9000 chameaux ! L'entreprise emploie plus de 300 personnes. Ce sont au total près de 4500 tonnes de lait de chamelle qui sont produites chaque année à Dubai. Dans les centres commerciaux locaux, le lait sur les étagères y est affiché à 5 euros le litre environ. Fondée au début des années 2000, Camelicious exporte également son lait dans le monde entier. Chaque matin, un laboratoire vétérinaire analyse les échantillons de lait de la dernière traite. Il est agréé par l'Union européenne où est exporté le lait en poudre. Un seul pays lui résiste encore : la Chine, le plus important marché au monde qui lui permettrait d'accéder à la rentabilité.
Créée sous l'impulsion du Dr Ulrich Wernery, un vétérinaire allemand, la ferme a innové dans tous les domaines. Alors que la traite manuelle était la règle, une salle avec des trayeuses automatiques adaptées à la chamelle a été conçue puis perfectionnée au fil des années, avec l'aide d'ingénieurs allemands. Elle joue encore aujourd'hui le rôle de centre de recherche appliquée. Ulrich Wernery milite d'ailleurs auprès de l'émir de Dubai, le cheikh Mohammed ben Rachid Al Maktoum, propriétaire de Camelicious, pour la création d'un institut consacré au lait de chamelle.

Du foin en provenance du Canada ou d'Australie

Bien qu'ils s'en défendent, les gestionnaires de Camelicious sont bien engagés dans une course à la production sur le modèle de l'industrie laitière intensive. En une dizaine d'années, la production est passée de 5 à 10 litres par jour. Pour y parvenir, le plus grand soin a été apporté dans le choix du cheptel. Des femelles ont été acquises auprès des nomades de l'est du Pakistan, connues pour leur haut potentiel laitier, mais également en Arabie saoudite. Faute de pâtures disponibles au milieu des dunes, le troupeau est nourri avec du foin en provenance d'Australie ou du Canada… complémenté avec des aliments concentrés. *« Oui, nous souhaitons atteindre une production de 15 litres par jour et par femelle* [la moitié de ce que produit en moyenne une vache laitière]. *Mais nous n'irons pas au-delà car nous sommes attentifs au bien-être de nos animaux,* se défend néanmoins Ulrich Wernery. *Nos chamelons sont laissés avec leur mère jusqu'à un mois sans intervention de nos équipes.* » Ne s'agit-il pas d'un vœu pieux ? Car il est bien possible d'aller au-delà : dans les troupeaux des nomades de l'est du Pakistan, les meilleures chamelles laitières produisent plus de 30 litres par jour…
À seulement quelques dizaines de kilomètres de là, la ferme d'Al Ain (3000 chameaux), espère aussi commercialiser son lait en Chine à brève échéance. De toutes parts, la concurrence se développe… Au Kazakhstan, l'autre pays du lait de chamelle, les coûts de production sont bien moindres, et l'on a recours à des individus hybrides *(lire l'encadré ci-dessus)*. À Almaty, le litre de « shubat » (lait de chamelle fermenté) est vendu 2,20 euros, soit entre deux et trois fois moins cher qu'à Dubai. La steppe offre des pâturages sans fin et la Chine se trouve de l'autre côté de la frontière. Pour tirer son épingle du jeu, il faudra produire davantage, moins cher… ■

Jean-François Lagrot (texte et photos)

GÉNÉTIQUE

Kazakhstan, le pays des hybrides

Situé sur le trajet de la route de la soie, ce vaste pays d'Asie centrale a vu transiter sur son territoire les caravanes chargées des marchandises les plus raffinées. Pour les transporter, des dromadaires du Proche-Orient et des chameaux de Bactriane en provenance d'Extrême-Orient s'y sont croisés durant des siècles. Bien qu'appartenant à deux espèces différentes, le chameau (deux bosses) et le dromadaire (une bosse) sont interféconds.
L'intérêt de leur hybridation est d'associer la robustesse du chameau à la productivité laitière du dromadaire. L'hybride de première génération est ainsi le plus robuste de tous les chameaux. Il peut porter jusqu'à 500 kg durant plusieurs jours. Depuis les années 2000, l'engouement des Kazakhs pour le lait de chamelle fermenté, appelé « shubat », est allé jusqu'à faire de ce breuvage la boisson nationale ! Les hybrides, qui produisent davantage de lait que les chameaux de Bactriane, représentent aujourd'hui 80 % du cheptel. Ceux de la première génération ont généralement une bosse tandis que les hybrides de deuxième génération en ont deux. Mais toutes les silhouettes intermédiaires sont possibles : une large bosse avec deux sommets distincts, deux bosses dont une rabattue sur le côté… Problème : le croisement de deux hybrides de première génération donne un animal agressif, ingérable !

Les silhouettes des hybrides de deuxième génération sont multiples : ici, avec une bosse rabattue.

SOWEE - AUGUSTIN DETIENNE/CAPA PICTURES

5 questions pour comprendre les mobilités de demain

Urbanisation galopante, nouveaux modes de travail, enjeux environnementaux : la mobilité évolue au rythme des changements de la société. La révolution des déplacements a déjà commencé.

1 Pourquoi les mobilités vont-elles sensiblement évoluer ?

D'ici à 2050, la Banque mondiale estime que près de sept personnes sur dix (68 %) vivront en milieu urbain contre un peu plus d'une sur deux (55 %) aujourd'hui. Cette urbanisation pose de nombreux défis en matière de transports. Cela concerne principalement la gestion des flux quotidiens (déplacements domicile-travail) qu'il faut aborder en intégrant trois critères : la fluidité du trafic, la sécurité des déplacements et la réduction de l'empreinte environnementale. Dans le cadre de l'objectif de réduction des gaz à effet de serre (GES) de 50 % d'ici à 2030 (par rapport à 1990) fixé par le gouvernement, l'idée est de proposer aux utilisateurs des moyens de déplacement décarbonés tout en s'assurant qu'ils soient disponibles au moment où s'expriment les besoins. Pour être attractifs, ils doivent être faciles d'utilisation et présenter un coût maîtrisé. Un ensemble de problématiques qui a donné naissance, au milieu des années 2010 en Finlande, au concept de MaaS, Mobility as a Service (mobilité en tant que service).

2 Comment répondre à la multiplicité des besoins ?

La MaaS consiste à proposer à chaque utilisateur la meilleure mobilité pour un trajet donné, à un instant T. Elle implique donc souvent de la multimodalité (passage d'un moyen de transport à un autre). Pour faire correspondre des besoins de mobilité multiples à une offre de moyens de transport plurielle, la collecte de données à grande échelle (big data) et leur traitement sont la base du système. L'application de l'intelligence artificielle à l'exploitation des informations récoltées permet, d'une part, d'analyser les déplacements en temps réel et, d'autre part, de réaliser des modèles prédictifs. Mais, pour que ces modélisations soient fiables, les différents acteurs de la mobilité — entreprises privées et publiques, utilisateurs — doivent partager leurs données (open data) dans le respect de la vie privée défini par le RGPD (Règlement général sur la protection des données).

3 Les mobilités « douces » (non motorisées) sont-elles la solution ?

Pour les trajets courts (moins de 2 km), le vélo, la trottinette ou la marche ont le vent en poupe. Selon l'Insee (recensement de la population de 2017), la marche est privilégiée par 30 % des individus, le vélo par 5 %, sachant que les transports en commun, eux, représentent près de 10 %. Mais la voiture séduit encore 53 % des utilisateurs sur ces

DU 13 AU 25 SEPT. 2024

IMMERSION DANS LE GRAND NORD CANADIEN

EXPÉDITION GROENLAND - TERRE DE BAFFIN LABRADOR - TERRE NEUVE

AMIS DU GRAND NORD, que les seuls noms de Groenland, Nunavut, Saint-Pierre et Miquelon fascinent, ce voyage est pour vous !

Bien sûr, il faudra vous armer de quelque patience et pratiquer un habile exercice mémotechnique pour retenir ceux de Kangerlussuaq, Qikiqtarjuak ou encore Nachvaq, escales parmi la douzaine que nous découvrirons lors des 13 jours d'expédition entre la grande île européenne et le Canada puis la France du bout du monde... Une occasion exceptionnelle de franchir le cercle Arctique, jouir de la beauté de paysages uniques, clarté des eaux, scintillement du glacier d'un fjord proche du parc national d'Auyuittuq.

Nous aurons la chance d'être en compagnie de Rémy Marion, que certains d'entre vous connaissent bien, membre de la société de Géographie, de la société des Explorateurs français, pour effectuer ce périple unique. Spécialiste des ours, auteur des « Métamorphoses de l'ours polaire » et de « Fort comme un ours », ce sera un guide naturaliste de premier ordre, décryptant aussi bien les secrets des ursidés que des glaciers, des morses ou des guillemots mais également prompt à nous rappeler l'épopée des Vikings ou les mythes des Inuits.

L'aboutissement du voyage, quatre jours entre l'Anse-aux-Meadows, Gros Morne à Terre-Neuve, et enfin Saint-Pierre et Miquelon devrait constituer une découverte exceptionnellement émouvante pour beaucoup d'entre nous.

Dr DOMINIQUE LEGLU
Directrice éditoriale de Sciences et Avenir - La Recherche, pôle Sciences du groupe Challenges.

AVEC LA PARTICIPATION DE [2]
RÉMY MARION, Guide, conférencier, spécialiste des ours
ET DOMINIQUE LEGLU, Directrice éditoriale de Sciences et Avenir

13 JOURS / 12 NUITS À BORD DE L'EXPLORIS ONE
À PARTIR DE 8 990 €/PERS. EN TOUT INCLUS [1]

Retrouvez tous les détails de ce voyage exceptionnel sur **www.sa-expedition.fr**
Renseignements | Tél. 01 84 76 22 35 | collection-infini@mycomm.fr

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

[1] Voir détails sur la brochure [2] Sous réserve de disponibilité

SARL Mycomm - 40 avenue Raspail - 94250 Gentilly • Immatriculation Atout France IM094100035 • Assurances Professionnelles by Hiscox - Tourisme Pro n° RCE1006 et n° RC1006-PJ0116 • Agence garantie par l'APST • RCS 510 368 400

Concept Graph. Atelier Pascale M (26) Photos © Destination Canada - 0002_004 - Nunavut - A9116678

AVIS D'EXPERT

ANTOINE LAFAY
DIRECTEUR RECHERCHE ET INNOVATION DES AIDES À LA CONDUITE CHEZ VALEO

« Les véhicules sans conducteur sont déjà une réalité »

SP

Qu'entend-on par véhicule autonome ?
La SAE (Society of Automotive Engineers) établit une classification de la conduite autonome selon cinq niveaux. Les niveaux 1 et 2 sont de l'assistance à la conduite, le conducteur restant responsable. Le niveau 3 permet une conduite autonome dans des conditions bien précises, dans un parking, sur autoroute ou dans les embouteillages. Les niveaux 4 et 5 définissent des véhicules capables de se déplacer sans conducteur, respectivement dans un périmètre délimité ou non.

Où en est le déploiement de ces technologies ?
Les modèles haut de gamme les plus récents proposent une conduite autonome de niveau 3. Le conducteur peut ainsi déléguer la conduite dans des situations précises et faire une autre activité, comme répondre à ses mails ou lire un livre. C'est autorisé par la loi européenne. Concernant les robots-taxis, ils sont déjà déployés par centaines dans plusieurs villes aux États-Unis (San Francisco, Phoenix, Austin) et en Chine (Pékin, Chongqing, Wuhan).

Quels sont les bénéfices attendus ?
Le premier de la conduite autonome est d'améliorer la sécurité, ce qui n'est pas forcément intuitif. Mais les récents retours d'expérience montrent, à utilisation équivalente, une baisse drastique de l'accidentologie des véhicules autonomes. Waymo (l'ancienne Google Car) a ainsi recensé presque sept fois moins d'accrochages sur plus de 11 millions de kilomètres parcourus. Le recours à des véhicules autonomes électriques, en remplacement des thermiques, est aussi synonyme de baisse de la pollution ; et pour les bus ou cars scolaires, il permettrait d'augmenter l'offre et la fréquence des transports. ■ **Propos recueillis par M. C.**

petits trajets ! C'est le vélo qui présente le potentiel le plus prometteur : sur les trajets de 2 à 5 km, il ne pèse que 5,1 % aujourd'hui. Mais les engins de déplacement personnel motorisés — EDPM, véhicule électrique sans place assise, prévu pour le déplacement d'une personne — posent aussi un certain nombre de questions en matière d'impact sur l'environnement (production des batteries), de sécurité ou de cohabitation avec les autres usagers. Quant aux vélos à assistance électrique (VAE), leur promotion est en contradiction avec l'encouragement de la population à une pratique sportive régulière…

4 La voiture individuelle est-elle condamnée ?

La voiture reste privilégiée dans 72 % des déplacements supérieurs à 80 km (Sdes, Enquête mobilité des personnes 2018-2019). Son existence n'est pas menacée mais elle doit s'adapter pour répondre aux nouvelles attentes de la société. En matière de pollution (la voiture compte pour 60 % des émissions de GES en 2022 selon l'Agence européenne pour l'environnement), elle a entamé sa transition vers l'électrique. En matière d'utilisation, elle passe de la possession à l'usage. Covoiturage, autopartage, location courte ou longue durée… La voiture est vue comme un moyen de transport parmi d'autres. Mais pour qu'elle s'intègre dans le concept de MaaS, il faut qu'elle communique avec les autres moyens de transport et les infrastructures (s'intégrant ainsi au concept de *smart city* ou ville connectée). Outre l'optimisation des déplacements, l'objectif poursuivi par les acteurs de la mobilité et les pouvoirs publics est l'amélioration de la sécurité et la fluidification du trafic, qui a aussi pour conséquence la baisse de la pollution.

5 Quelle énergie pour les transports de demain ?

Si diverses voies sont explorées, l'électrique reste la plus intéressante pour les transports. D'abord parce qu'elle apporte des bénéfices immédiats grâce à la suppression totale des émissions lors de l'utilisation. Elle fait, de surcroît, consensus, tant au niveau des constructeurs que des grandes zones géographiques. Or, son échelle de déploiement est la condition *sine qua non* pour avoir un effet significatif sur l'environnement. Il reste des freins en matière de coût, d'autonomie ou de temps de charge, mais ces critères ne sont pas aussi bloquants sur un bus que sur une voiture individuelle. Quant à la question de l'origine de l'électricité, la part de renouvelable est en constante augmentation (14 % en 2022 contre 8,8 % en 2012 selon le ministère de la Transition écologique) et, en France, le nucléaire offre un mode de production décarboné. Gaz naturel, hydrogène, biocarburants… Des alternatives sont explorées, mais aucune ne cumule aujourd'hui autant d'atouts que l'électrique. ■ **Mathieu Chevalier, avec Agence Forum News**

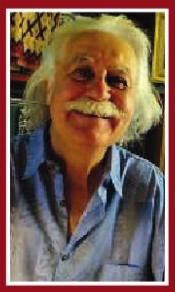
Les voyages du SAVOIR SCIENCES ET AVENIR La Recherche

ATAPUERCA, ALTAMIRA

évolution de l'humanité, évolution de l'art

du 25 au 29 septembre 2024

Découvrez ces sites préhistoriques majeurs en compagnie de :



JEAN-MICHEL GENESTE
Archéologue,
Conservateur général du patrimoine

ANTOINE BALZEAU
Paléoanthropologue, directeur de recherche au CNRS

Fouille Gran Dolina Photo Mario Modesto

Au cœur du chemin de Saint-Jacques **l'incroyable site d'Atapuerca**, joyau de l'archéologie, est considéré comme la pierre de Rosette de l'évolution de l'humain en Europe. Classé au Patrimoine mondial de l'Unesco, le site est un référent incontournable pour les recherches sur l'évolution humaine.

Altamira Photo : Yvon Fruneau © Unesco

Découverte en 1879 **Altamira**, « l'autre Sixtine de l'Occident », est la première grotte ornée qui, avant Lascaux, avant Chauvet, avant Cosquer a marqué l'histoire de la découverte et de l'étude de l'art du paléolithique.

Marine Benoit
Rédactrice
Archéologie
Histoire de Sciences
et Avenir-La Recherche

Des ossements par milliers... le site d'**Atapuerca** est une mine d'or pour les paléontologues qui depuis des décennies, et encore aujourd'hui, exhument des spécimens rares qui permettent d'écrire – voire de réécrire – l'histoire de notre humanité.

Altamira, une légende dans la grande histoire de la découverte de l'art préhistorique européen qui s'est poursuivie avec Lascaux, Chauvet, Cosquer !

Quel privilège que de pouvoir découvrir les multiples découvertes réalisées sur le terrain en compagnie de ces deux grands scientifiques et de leurs collègues et amis locaux. Ils nous éclaireront sur les trésors que contiennent le musée de la Préhistoire et d'Archéologie de Santander et celui de l'Évolution humaine de Burgos, le plus grand centre dédié à ce thème en Europe.

Ne manquez pas ce **Voyage du Savoir** au nord de la péninsule Ibérique imaginé spécialement pour les lecteurs de Sciences et Avenir-La Recherche !

Au programme : **Burgos** : les fouilles d'Atapuerca, le musée de l'Évolution humaine ; **Puente Viesgos** : les grottes del Castillo ; **Santillana del Mar** : la réplique de la célèbre grotte d'Altamira ; **Santander** : le musée de la Préhistoire et d'Archéologie de Cantabrique ; **Zestoa** : la grotte d'Ekain.

4 nuits / 5 jours de Biarritz à Biarritz 1.670 € par personne en pension complète.

PROGRAMME, RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS :

blb-tourisme.bzh/voyages-du-savoir

Ou scannez

Organisation technique BLB TOURISME

BLB TOURISME Zone de KERBOIS 15, Rue Yves de Kerguelen 56400 AURAY

Tél : 02 97 56 60 86 Courriel : inscription@blb-tourisme.com

VOISIN/PHANIE

Chez l'adolescent, la consommation régulière de cannabis a des effets délétères sur le cerveau en plein développement. Le THC perturbe notamment les structures nécessaires à la mémorisation et à la projection dans l'avenir.

Cannabis
Ses véritables effets sur le cerveau

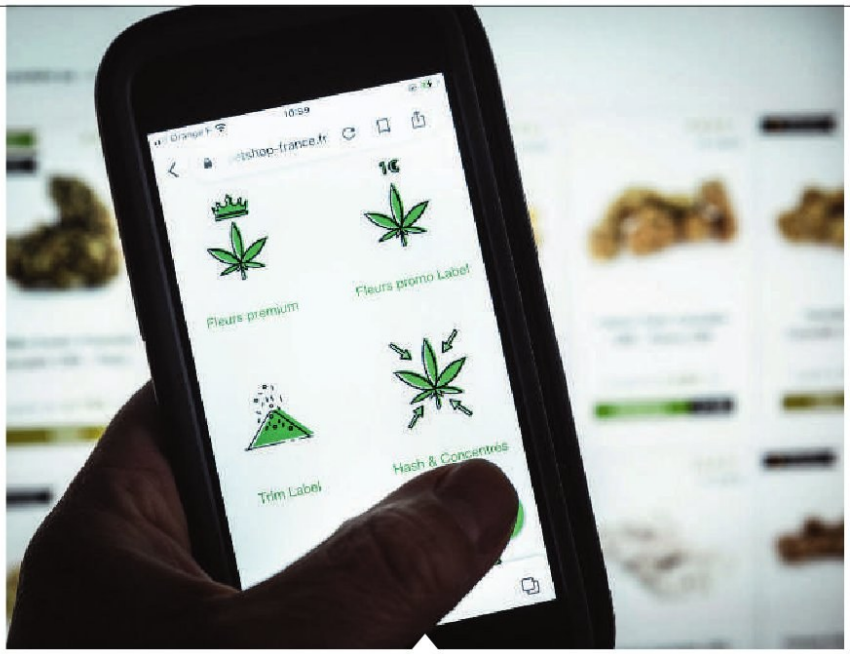
Les effets toxiques du THC sur l'activité cérébrale sont désormais bien documentés grâce au recul offert par la légalisation du cannabis dans de nombreux États américains depuis une décennie. Les adolescents sont particulièrement vulnérables : une consommation précoce et régulière aggrave le risque de développer une dépendance et des crises psychotiques. Explications.

Par Pierre Kaldy

« *Une grave erreur sanitaire.* » Voici la mise en garde faite en octobre 2023 par l'Académie nationale de médecine à l'idée d'une légalisation du cannabis en France. Les spécialistes ont rappelé que si les vertus thérapeutiques du cannabis restaient peu étayées, la toxicité de sa principale composante psychotrope, le THC (delta-9-tétrahydrocannabinol), était, elle, « *parfaitement établie* ». Pendant longtemps, le cannabis a été considéré avec indulgence en comparaison de drogues qualifiées de « dures ». Notamment parce que sa consommation n'entraîne pas de mort par overdose, contrairement à l'héroïne ou à la cocaïne. C'est terminé. Le recul offert par la légalisation de la consommation de cannabis dans de nombreux États depuis une décennie, dont 24 aux États-Unis représentant la majorité des Américains, a permis de mettre sous le feu des projecteurs les effets délétères du cannabis dit récréatif.

Après avoir fumé les feuilles ou les fleurs de la plante sous forme de joint, le THC qu'elles contiennent gagne le sang puis le cerveau en quelques minutes. Les propriétés hallucinogènes de ce cannabinoïde se révèlent alors. « *Parmi ses nombreux effets, il stimule comme les autres drogues la libération de dopamine dans le circuit de la récompense situé au centre du cerveau, ce qui procure une sensation gratifiante de bien-être* », précise Alain Dervaux, ▸

professeur de psychiatrie et d'addictologie aux hôpitaux Barthélemy-Durand à Étampes et Paul-Brousse à Villejuif. Il va aussi agir sur l'amygdale, centre de la mémoire émotionnelle et sur les cortex préfrontal et frontal, sièges de la réflexion et de la planification. « *Sur le plan psychologique, le résultat sera une euphorie et des effets désinhibiteurs réduisant pendant quelques heures l'anxiété sociale, parfois aussi les sentiments de frustration ou l'intensité d'émotions trop fortes, mais cela ne dure qu'un temps,* prévient Alain Dervaux. *Et après quelques mois ou années, la personne a beaucoup plus de mal à trouver en elle-même les ressources psychologiques pour surmonter naturellement ces difficultés.* »



KERMALO/REA

Le cannabidiol (CBD), un des principaux composants du cannabis sans effet psychotrope, est autorisé à la vente en France depuis fin 2022.

Une altération des capacités d'attention chez les plus jeunes

Un autre effet du THC, découvert en 2012, est de réduire le métabolisme cellulaire. En effet, ce petit lipide se diffuse facilement dans les cellules et perturbe leurs centrales énergétiques, les mitochondries. Il en résulte à la longue une diminution de l'irrigation sanguine du cerveau, notamment dans le cortex préfrontal et l'hippocampe, structure cérébrale cruciale pour la mémorisation. Consommé de manière régulière, le THC laisse alors apparaître un visage bien plus toxique *(voir l'infographie ci-contre)*.

« *C'est au cours de l'adolescence, au moment où le cerveau est en plein remaniement, que le THC a le plus d'effets dangereux car il perturbe notamment la formation de structures nécessaires à la mémorisation et à la projection dans l'avenir* », précise Alain Dervaux. En 2021, une vaste étude européenne d'imagerie cérébrale publiée dans la revue *Jama Psychiatry* a même révélé un amincissement du cortex frontal chez les adolescents, proportionnel à la quantité de cannabis consommée et associé à une altération des capacités d'attention. Cet effet semble avoir des conséquences à plus long terme sur l'insertion sociale. Une étude française pilotée par l'Inserm sur la cohorte Tempo — soit près de 1500 jeunes âgés de 22 à 25 ans — a montré en 2022 que, pour ceux qui ont commencé à fumer du cannabis avant 17 ans, le risque de se retrouver longuement sans emploi était quatre fois plus élevé que pour ceux n'ayant jamais fumé, et cela indépendamment du contexte familial ou social. Une autre étude avait déjà mesuré l'impact à long terme d'une

MOLÉCULE

Le CBD : des effets mal déterminés sur l'organisme

Le CBD ou cannabidiol est un cannabinoïde de structure proche du THC mais qui a peu d'affinité avec les récepteurs CB1 et n'a donc pas l'effet psychoactif d'un stupéfiant. Il agit sur de nombreux types de récepteurs dans le corps humain. Un médicament à base de CBD, l'Epidyolex, est déjà commercialisé pour réduire la fréquence des épilepsies pharmacorésistantes dans trois maladies épileptiques rares. Aucune donnée scientifique n'a toutefois validé ses motifs d'usage décrits dans le commerce. Il est fortement déconseillé aux femmes enceintes en raison d'effets possibles sur le fœtus, ainsi qu'aux personnes prenant des médicaments avec lesquels il peut interférer. Le CBD peut entraîner de la somnolence, de la fatigue, une baisse d'appétit et des diarrhées. Son absorption est également déconseillée avant de conduire car du THC peut subsister dans les produits commerciaux extraits de la plante et rendre positif un test salivaire de recherche des stupéfiants demandé par les forces de l'ordre.

consommation régulière de cannabis. *« Elle a suivi sur vingt-cinq ans une cohorte de sujets néo-zélandais, dont certains fumeurs réguliers de cannabis, et trouvé une baisse de six points de leur QI indépendante du niveau d'étude chez ceux ayant commencé à fumer du cannabis à l'adolescence »*, ajoute Alain Dervaux.

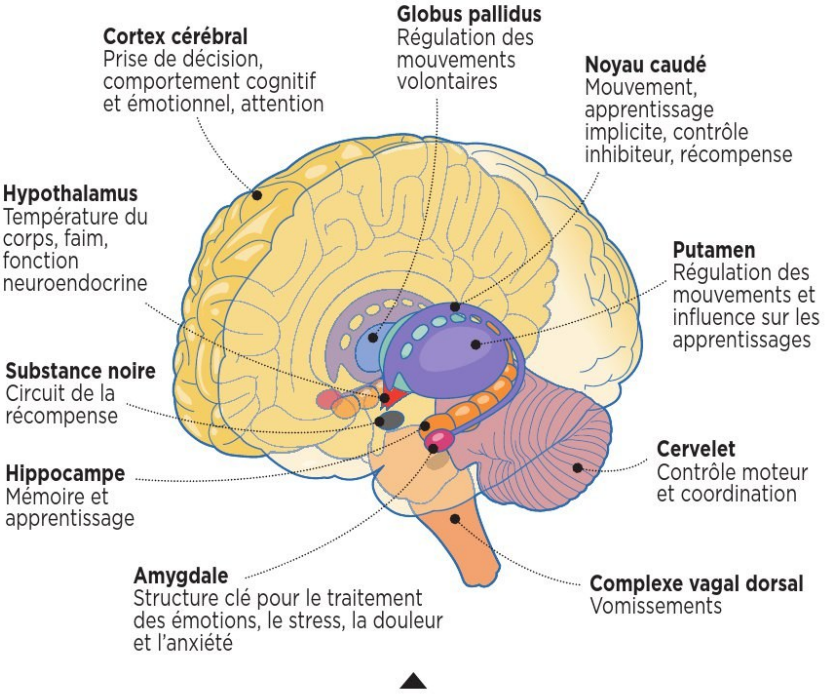
La consommation de THC précoce et régulière présente le risque plus grave encore d'induire une crise psychotique, délire où les sujets ont par exemple l'impression d'être surveillés, épiés ou qu'on lit dans leurs pensées. Dès le premier joint, des symptômes ressemblant à cette crise apparaissent même chez environ 15 % des personnes sans prédisposition génétique.

Plus de 10 % des consommateurs développent une addiction

Chez les fumeurs réguliers, les épisodes de psychose peuvent survenir peu après l'exposition à de fortes doses de THC. *« Pire, ils peuvent être le prélude à un trouble schizophrénique et de nombreuses études, tant aux niveaux physiologique, génétique qu'épidémiologique, pointent le rôle de la consommation régulière de THC pour précipiter le déclenchement de cette maladie psychiatrique »*, rappelle Marie-Odile Krebs, professeure et chercheuse à l'Institut de psychiatrie et neurosciences de Paris. Une vaste étude menée au Danemark a confirmé que les fumeurs de cannabis développent plus souvent des troubles schizophréniques que les non-fumeurs, et cela indépendamment de leurs risques génétiques.

NEUROLOGIE

Les zones affectées par le cannabis



BRUNO BOURGEOIS - SOURCE: NATURE

Ces parties du cerveau, particulièrement riches en récepteurs CB1 qui fixent le THC, sont perturbées par la consommation régulière de cannabis.

Sans surprise, les médecins ont enregistré une augmentation des visites aux urgences pour épisode psychotique dans les premiers pays ayant libéralisé sa consommation. Ce fut le cas notamment du Colorado, premier État américain avec celui de Washington à autoriser la consommation de cannabis en 2012, ou du Canada après 2018. Cette augmentation paraît aussi liée à celle du taux de THC dans le cannabis depuis le début des années 2000 : les hospitalisations pour épisode psychotique associé au cannabis ont triplé entre 2006 et 2015 au Canada, alors que le nombre de consommateurs n'avait pas sensiblement augmenté. *« En France, où la consommation de cannabis est l'une des plus élevées d'Europe, on ne connaît pas l'incidence des hospitalisations pour un premier épisode psychotique, et* a fortiori *celles liées au cannabis, car elle n'est pas mesurée »*, regrette Marie-Odile Krebs.

Les médecins ont également constaté que les épisodes psychotiques ont moins de risque de se renouveler si l'usage du stupéfiant est interrompu. Mais arrêter de fumer peut s'avérer bien difficile. Pendant longtemps, les spécialistes ont aussi cru que le cannabis n'induisait pas de dépendance, contrairement à la nicotine ou à l'alcool. *« On sait maintenant que plus*

MARIE-ODILE KREBS

« De nombreuses études pointent le rôle de la consommation régulière de THC pour précipiter le déclenchement de la schizophrénie »

Marie-Odile Krebs, professeure et chercheuse à l'Institut de psychiatrie et neurosciences de Paris

N. AUTHIER

3 QUESTIONS À

NICOLAS AUTHIER

PSYCHIATRE AU CHU DE CLERMONT-FERRAND

« Les cannabinoïdes thérapeutiques pourraient être accessibles dès 2025 »

Nicolas Authier a piloté l'expérimentation médicale de THC et CBD thérapeutiques lancée en 2020 par l'État et prolongée jusqu'à la fin de l'année pour des patients atteints de maladies graves.

Quel était le but de cette expérimentation ?
Elle visait à valider les conditions d'accès à des médicaments contenant les deux cannabinoïdes pris par voie orale, ou un traitement à base de vapeurs de fleurs séchées de cannabis. La prescription hospitalière et l'accès aux médicaments en pharmacie sont en place, la prescription en médecine de ville va prendre plus de temps. Si les décrets d'application sont votés cette année, ces traitements seront accessibles et remboursés dès 2025.

Quels effets thérapeutiques avez-vous eus avec ces médicaments ?
Nous avons obtenu un soulagement de douleurs neuropathiques et une diminution des spasmes musculaires pour la sclérose en plaques ou certaines épilepsies chez 30 % à 40 % des patients en impasse thérapeutique. Le traitement n'a pas induit de dépendance pour le moment chez les 3000 patients traités.

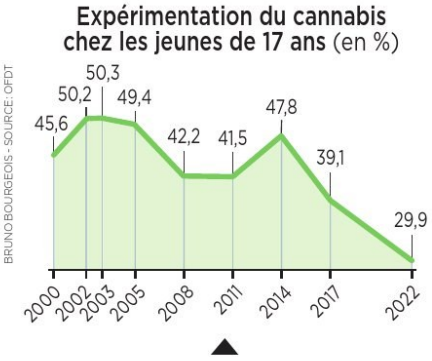
LALO DE ALMEIDA/FOLHAPRESS/PANOS-REA

La prescription de médicaments contenant du THC et du CBD est en cours d'expérimentation en France depuis 2020 (ici une plantation de cannabis médical en Israël).

Peut-on encore parler de « cannabis thérapeutique ou médical » ?
C'est un abus de langage. Parle-t-on d'opium thérapeutique quand on utilise de la morphine ? Ce sont des cannabinoïdes médicaux, des médicaments à part entière qui doivent être utilisés dans des indications précises, avec des doses de THC bien inférieures à celle du stupéfiant et sous étroit contrôle médical. Elles se situent le plus souvent entre 10 et 30 mg/jour pour des patients ne consommant pas au préalable de cannabis. Sinon, du fait de la tolérance au THC déjà acquise, il est souvent nécessaire d'augmenter la dose, parfois à 100 mg/jour en plusieurs prises.

Propos recueillis par P. K.

de 10 % des consommateurs de cannabis développent une véritable addiction à cette drogue indépendamment du tabac », alerte Alain Dervaux. La forte proportion de personnes schizophrènes ou dépressives « accro » au cannabis a pu contribuer à lui prêter des vertus antidépressives ou anxiolytiques. « *En fait, c'est tout le contraire,* souligne Alain Dervaux. *Le THC fait illusion sur le moment, mais on sait maintenant qu'il aggrave à long terme ces maladies.* »
Cette addiction se caractérise par une perte de contrôle et l'envie irrépressible de fumer sa dose quotidienne au détriment de toute autre activité. « *Dans ce cas, comme pour les autres drogues, un phénomène de tolérance pharmacologique s'installe qui pousse à une consommation croissante de THC, tandis que son arrêt s'accompagne progressivement de troubles physiques et psychiques* », ajoute le clinicien. Un cercle vicieux peut alors s'enclencher où la recherche du stupéfiant limite les projets à long terme et sa consommation va réduire les capacités à les réaliser. Mais, contrairement au tabagisme qui peut être traité avec une substitution par des patchs à la



La consommation de cannabis en France est en nette baisse depuis 2014 chez les jeunes.

nicotine, il n'existe actuellement aucun moyen médicamenteux de rompre cet engrenage avec le THC. *« Le plus efficace reste la psychothérapie, notamment l'approche motivationnelle, où l'on aide le sujet à prendre progressivement conscience des problèmes induits par sa consommation de cannabis et à trouver des stratégies pour s'en affranchir »*, précise Alain Dervaux.

Des facteurs de risque de dépendance génétiques

Les principaux facteurs de risque de dépendance au THC ont été mis en évidence dans de vastes études de populations aux États-Unis et en Europe comprenant des sujets qui fumaient quotidiennement du cannabis. Ces facteurs peuvent être liés à une histoire personnelle, par exemple une enfance traumatique, mais aussi génétiques, avec de nombreux gènes impliqués, comme l'a révélé en 2023 une étude effectuée sur plus d'un million d'anciens combattants aux États-Unis.

« Un autre facteur de risque de dépendance est apparu avec les concentrations croissantes de THC présentes dans les plants cultivés, la résine ou l'huile de cannabis », observe Alain Dervaux. L'herbe du siècle passé qui n'avait que quelques pourcents de THC en contient désormais 13 % en moyenne, et parfois beaucoup plus dans certaines variétés comme la skunk, très prisée dans les pays anglo-saxons. En Allemagne, le pourcentage des hospitalisations dues à une dépendance au cannabis a été multiplié par cinq entre 2000 et 2018, période qui a coïncidé avec l'augmentation du taux de THC dans le cannabis cultivé.

Un quatrième facteur favorisant fortement le développement de la dépendance est, comme pour la nicotine, le début précoce de la consommation de cannabis. Cette dépendance est particulièrement problématique chez la femme enceinte, car le THC absorbé par la mère diffuse rapidement dans le placenta et s'accumule dans le cerveau de l'embryon. Aux États-Unis, le pourcentage de femmes enceintes utilisant du cannabis pour réduire les nausées matinales est passé de 3,4 % en 2002 à 7 % en 2017, quand son usage médical a été autorisé. Cette augmentation n'était pas due le plus souvent à des prescriptions médicales, mais à une automédication encouragée par la validation officielle d'un effet thérapeutique.

Or, outre un risque plus élevé de faible croissance du fœtus, de faible poids à la naissance et de prématurité, l'exposition prénatale au THC a des conséquences à plus long terme sur l'individu. La récente progression du nombre de jeunes américains ainsi exposés *in utero* au THC a eu des conséquences mesurables. En 2020, une enquête portant sur des enfants âgés de 10 ans a montré qu'ils présentaient plus souvent des troubles de l'attention, du comportement, voire psychotiques, et cela indépendamment du contexte génétique ou familial. En 2021, une autre étude, qui a suivi des enfants entre 3 et 6 ans, a révélé qu'ils présentaient plus souvent de l'anxiété, de l'agressivité et de l'hyperactivité. Chez le jeune adulte, des anomalies du fonctionnement cérébral ont été décelées par imagerie. Elles correspondaient à une altération de leur mémoire de travail visuo-spatiale et à une augmentation de leur impulsivité. Les risques à long terme pour l'enfant à naître sont maintenant avérés et conduisent tous les médecins américains à fortement déconseiller une exposition au cannabis pendant la grossesse.

Ce tableau inquiétant des effets du cannabis sur le cerveau comporte néanmoins des éléments d'espoir. *« Le premier est que chez l'adulte, les effets sur la cognition sont réversibles »*, rassure Alain Dervaux. Le deuxième est que des molécules pouvant aider les sujets à sortir de leur dépendance sont activement recherchées. Enfin, comme pour l'alcool et le tabac, la consommation de cannabis baisse nettement depuis dix ans chez les jeunes en France, selon les enquêtes de l'Observatoire français des drogues et des tendances addictives (OFDT). *« Pour consolider cette tendance positive, et face aux nouveaux cannabinoïdes synthétiques qui arrivent, il est nécessaire de renforcer les efforts de prévention, notamment auprès des adolescents et des femmes enceintes »*, conclut Alain Dervaux. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

- Drogues Info Service, service d'information, d'écoute et d'orientation sur les drogues et les dépendances : **www.drogues-info-service.fr** ; **0.800.23.13.13**
- Portail d'aide du fonds Addict'Aide : **sciav.fr/925addictaides**
- Site d'information jeunesse pour la prévention de la schizophrénie : **sciav.fr/925psyjeunes**

ALAIN DERVAUX

« Un élément d'espoir est que chez l'adulte, les effets sur la cognition sont réversibles »

Alain Dervaux, professeur de psychiatrie et d'addictologie aux hôpitaux Barthélemy-Durand, à Étampes, et Paul-Brousse, à Villejuif

Comment en finir avec la toux chronique

La toux chronique réfractaire aux traitements ou inexpliquée (Tocri) est désormais reconnue comme une maladie et non plus comme un simple symptôme. La recherche s'attelle à déterminer les causes de cette affection pour mieux la prendre en charge.

Imaginez-vous être pris de quintes de toux quotidiennes depuis plus de huit semaines et parfois même des années jusqu'à en avoir parfois la respiration coupée. Un enfer… Sans compter que depuis le Covid-19, tousser dans un lieu public est devenu hautement suspect et s'accompagne rapidement de regards soupçonneux. Si une toux chronique ne doit jamais être banalisée afin de ne pas passer à côté d'une éventuelle pathologie grave (telle une tumeur pulmonaire évolutive), les spécialistes réunis lors des 4es Rencontres de la toux, en décembre 2023 à Vanves (Hauts-de-Seine), ont aujourd'hui un message clef à faire passer : *« Ne plus considérer la toux chronique uniquement comme un symptôme mais comme une maladie »*, insiste l'organisateur des journées, le Pr Laurent Guilleminault, pneumologue au CHU de Toulouse, où se trouve la seule consultation hospitalière à lui être consacrée. *« Il est urgent d'améliorer la prise en charge de ces patients souvent désemparés, dont la vie peut devenir incroyablement pénible et compliquée »*, renchérit le Dr Danielle Brouquières, pneumologue-allergologue à l'hôpital Larrey, à Toulouse.

Mais qu'est-ce que tousser ? C'est d'abord un réflexe naturel de protection des voies respiratoires, caractérisé par l'expulsion violente (et bruyante) de l'air contenu dans les poumons. Cela commence souvent par une sensation de gêne dans l'arrière-gorge *(voir l'infographie p.75)*. Puis c'est l'emballement. Et, selon les cas, survient soit une toux grasse (dite productive, avec besoin de cracher) soit une toux sèche. Si *« la première est impossible à empêcher et doit même être encouragée, car elle permet l'évacuation du mucus encombrant les bronches »*, précise Caroline Coudière (orthophoniste, Toulouse), la seconde peut très vite devenir une source d'inconfort et de gêne. Surtout, bien sûr, si elle s'éternise.

Moins de 3 semaines : toux aiguë.

Plus de 8 semaines : toux chronique.

4,8 % Le taux de prévalence en France de la toux chronique.

200 000 patients atteints de Tocri (toux chronique réfractaire ou inexpliquée) en France.

SOURCE : SOCIÉTÉ DE PNEUMOLOGIE DE LANGUE FRANÇAISE.

Heureusement, le plus souvent, une toux dure moins de trois semaines, en lien avec une infection virale ou bactérienne. Mais elle peut devenir chronique, un seuil arbitraire ayant été fixé à une durée de plus de huit semaines. On estime que sa prévalence serait en France de 4,8 % et elle est liée à une exposition au tabac, à un asthme, à un reflux gastro-œsophagien, à une sinusite, ou encore à la prise de certains médicaments utilisés dans l'hypertension (sartans, inhibiteurs de l'enzyme de conversion).

PHOTO12/ALAMY/ANDRIY POPOV

Des quintes de toux à répétition et sur de longues périodes peuvent affecter fortement la qualité de vie des patients.

Mais parfois, aucune cause n'est trouvée, et ce malgré une exploration médicale approfondie (pneumologie, ORL, gastro-entérologie…). « *On parle alors de Tocri, pour toux chronique réfractaire aux traitements ou inexpliquée, une affection qui concerne 0,3 % de la population, soit environ 200 000 personnes en France* », détaille Laurent Guilleminault. Les patients concernés se voient alors prescrire des molécules non spécifiques comme des antalgiques, des antidépresseurs ou de la morphine, en association le plus souvent avec une rééducation (orthophonie, kinésithérapie). Et s'il est toujours possible d'avoir recours à des techniques dites SOS pour enrayer les quintes *(lire l'encadré p. 74)*, « *il n'existe à ce jour aucun traitement ayant une autorisation de mise sur le marché dans la toux chronique* », précise le spécialiste.

ENTRAIDE

Une association pour tousseurs chroniques

« En pratique, mes quintes de toux surviennent au cours de la journée toutes les dix minutes depuis seize ans, surtout dans les espaces fermés, et encore plus si je parle », résume Édith Arnu, aujourd'hui âgée de 76 ans, qui ne se sépare pas de sa boîte de bonbons au menthol pour en consommer jusqu'à 100 par jour. Atteinte de toux chronique réfractaire ou inexpliquée (Tocri), elle a fondé en 2012 l'Association des tousseurs chroniques* (ATC), la seule du genre. Son objectif : créer du lien entre les patients souvent isolés et mal compris et les informer des avancées scientifiques.

* www.atc-asso.fr

Pour ces « patients Tocri », tout se passe un peu comme si « *le réflexe initial de protection des voies aériennes avait la particularité, selon des mécanismes précis que l'on ignore encore, de s'exacerber et de devenir pathologique* », poursuit le pneumologue. Avec pas moins de quatre sociétés savantes*, il a piloté la rédaction des recommandations nationales de prise en charge de la toux chronique, qui viennent d'être publiées fin 2023. Un texte très attendu car rien n'avait été actualisé depuis vingt ans. Il valide d'une part le concept de Tocri et formalise, d'autre part, un algorithme de prise en charge pour les médecins confrontés à leurs patients tousseurs.

Évaluer la sévérité sur une échelle de 1 à 10 comme pour la douleur

« Pendant longtemps, on s'est contenté de dire à ces tousseurs chroniques, dont la qualité de vie peut être très altérée (troubles du sommeil, fatigue, maux de tête, incontinence, douleurs mus-

MÉTHODES

Contrer la toux d'irritation

Comment bloquer une toux d'irritation ? Plusieurs techniques existent, comme celles des trois sniff (bouche fermée, trois inspirations rapides par le nez puis expiration lente par la bouche, lèvres pincées, à répéter trois à cinq fois d'affilée) ou de la respiration lente avec une paille fine. *« Ces pratiques sont efficaces pour enrayer les quintes »*, précise Caroline Coudière, orthophoniste à Toulouse. Tout comme l'automassage externe du larynx, la déglutition d'eau ou avec un bonbon, par exemple au menthol, dont la particularité, par son action sur certains récepteurs, est d'augmenter le seuil de réflexe de la toux et donc de diminuer les accès de toux.
Mais l'effet n'est que de courte durée. Et dans tous les cas, il ne faut pas oublier de bien s'hydrater, les cordes vocales apprécieront.

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR-LA RECHERCHE

Respirer lentement avec une paille permet stopper la toux.

culaires, syncopes et parfois fractures de côtes), que tout se passait "dans leur tête", détaille Danielle Brouquières. *Or, en pratique, c'est nettement plus compliqué, ces patients devenant avec les années hypersensibles à différents stimuli comme la parole ou le rire.* »
Pour mieux prendre en charge ces tousseurs hypersensibles, les pneumologues réunis en décembre dernier estiment qu'il faudrait que les médecins ne se contentent pas du simple *« Vous fumez ? vous toussez ? »* et évaluent précisément la sévérité d'une toux — tout comme pour une douleur — sur une échelle de 1 à 10. De quoi ouvrir la voie à une recherche des causes du déclenchement initial, certes au prix d'un interrogatoire complet pouvant nécessiter une demi-heure de consultation. *« C'est important pour ces patients souvent en longue errance thérapeutique entre pneumologue, ORL, gastro-entérologue et psychiatre de voir poser enfin un mot sur leur pathologie »*, pointe Danielle Brouquières.

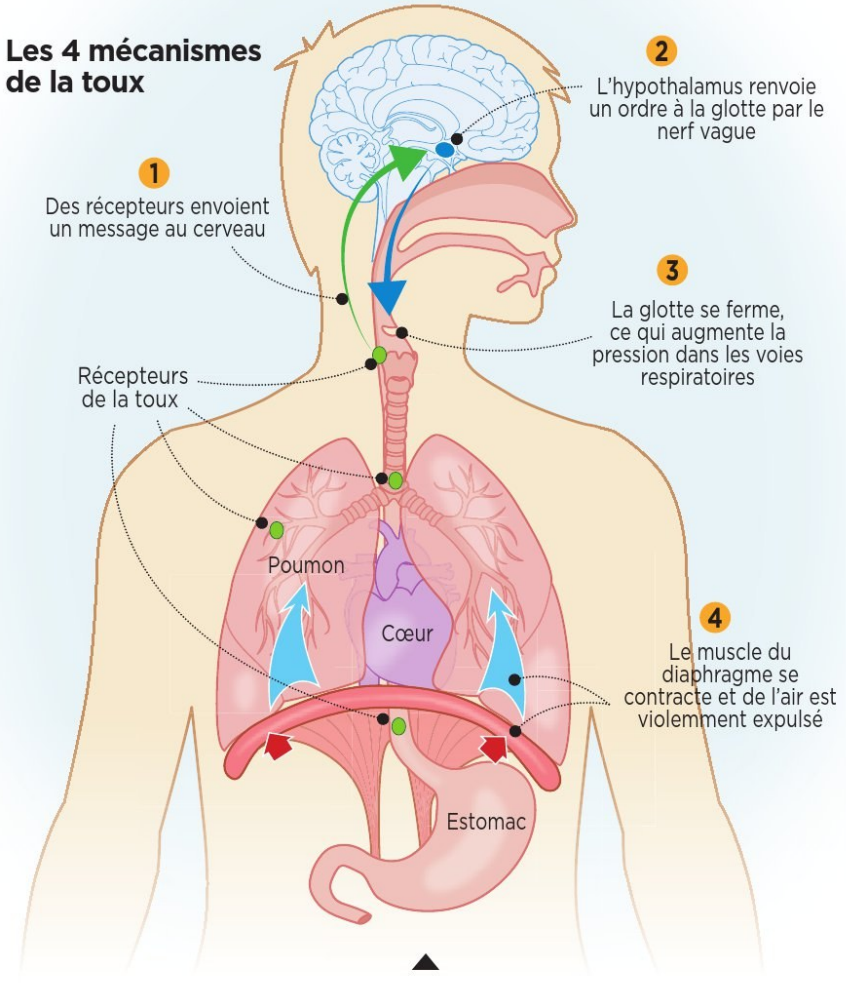
Une molécule commercialisée au Japon et en Suisse

Quant à l'origine même de la toux, il faut savoir qu'elle est provoquée par l'irritation de nombreux récepteurs, tant mécaniques que chimiques, présents à la surface de cellules et de certaines fibres nerveuses issues du nerf vague — le plus étendu des nerfs crâniens — et répartis dans différentes zones du corps *(voir l'infographie ci-contre)*. Ce sont eux qui transmettent au cerveau le message permettant de fermer la glotte, notamment face à un corps étranger (la cacahuète avalée de travers) qu'il faut expulser rapidement pour éviter la fausse route, provoquant une toux aiguë. D'autres récepteurs (dits TRPA1V1) réagissent, eux, à un environnement inflammatoire. Bloquer leur action pour contrer le réflexe de toux a d'ailleurs été un temps envisagé. Mais les tests prometteurs sur l'animal n'ont pas confirmé leurs résultats une fois évalués chez l'humain.
Aujourd'hui, différents laboratoires (Merck, GSK, Bayer) ciblent d'autres récepteurs, dits P2X3, présents dans les muqueuses des voies respiratoires et intervenant dans le déclenchement et l'entretien de la toux. Des études cliniques avec des molécules bloquant ces récepteurs auprès de plus d'un millier de patients ont permis de réduire significativement (de 25 %) la fréquence de la toux des participants aux essais. Des résultats encourageants, publiés en 2022 dans la revue *The Lancet*. Malgré quelques effets indésirables (essentiellement des troubles réversibles du goût), la molécule a été commercialisée en Suisse et au Japon. Son arrivée sur le marché américain était initialement pré-

D. BROUQUIÈRES

« C'est important pour ces patients souvent en longue errance thérapeutique de voir poser enfin un mot sur leur pathologie »

Danielle Brouquières, pneumologue-allergologue à l'hôpital Larrey (CHU de Toulouse)



Lorsque les voies aériennes sont irritées ou obstruées, un message est envoyé au cerveau qui le répercute sur l'ensemble du système respiratoire. La glotte se referme, le diaphrame remonte et l'air comprimé dans les poumons est éjecté en produisant un son au contact des cordes vocales.

BRUNO BOURGEOIS

vue pour le début de 2024, mais, dans les tout derniers jours de décembre, l'autorité sanitaire américaine, la Food and Drug Administration, n'a finalement pas donné son autorisation et a demandé des mesures complémentaires. Pour le moment, il n'y a pas eu de démarche d'autorisation en Europe.

Une toux parfois annonciatrice d'une maladie génétique rare

D'autres molécules (campilixant, eliapixant, sivopixant…) sont également en phase de test sur ces P2X3. « *La vision actuelle de la Tocri nous permet d'envisager deux mécanismes,* explique Laurent Guilleminault. *D'une part, l'excès de sensibilité des récepteurs de la toux, et, d'autre part, une dysfonction du larynx. Mais nous manquons d'outils de diagnostic pour explorer cet organe.* » C'est qu'il n'est pas simple d'investiguer et de quantifier les efforts produits pendant une toux. Lors de la mise au point d'essais cliniques et dans le cadre uniquement de protocoles de recherche, les équipes ont parfois recours à des capteurs portables. Un peu comme pour enregistrer la tension artérielle sur 24 heures. Mais ici, tout se passe avec un algorithme intégré dans le capteur capable de mesurer durant 24 heures la fréquence et l'intensité des accès de toux, avec, pour certains dispositifs, un micro intégré. Des mesures qui manquent toutefois encore de précision. En parallèle des travaux sur les pistes thérapeutiques, d'autres, de génétique cette fois, ont conduit les médecins à s'intéresser à un étrange syndrome. Baptisé Canvas (Cerebellar ataxia with neuropathy and vestibular areflexia syndrome), il s'agit d'une maladie génétique nouvellement découverte, où curieusement la toux précède de plusieurs dizaines d'années l'apparition de symptômes neurologiques (perte d'équilibre, manque de coordination des mouvements). « *On estime actuellement que cette maladie, initialement considérée comme rare, serait aussi fréquente que la mucoviscidose* », avance le Dr Anne-Sophie Lia, de l'unité de recherche Neurit à l'université de Limoges.

C'est une équipe anglaise, qui, en 2019, a révélé l'existence de l'anomalie génétique située au niveau du gène RFC1 en lien avec le syndrome Canvas. « *Dès 2020, avec le service de biochimie et de génétique du CHU de Limoges et les Dr Pauline Chazelas et Corinne Magdelaine, nous avons mis au point un test sanguin de diagnostic pour que les spécialistes puissent le proposer à leurs patients tousseurs,* détaille Anne-Sophie Lia. *Nous avons depuis démontré dans une cohorte de 68 patients Tocri que 17 % présentaient un Canvas.* » Il n'est pas sûr toutefois, comme le pointaient certains spécialistes lors du colloque de décembre dernier, que tous les patients Tocri aient envie de se faire tester et savoir s'ils développeront à terme cette affection qui fait partie des neuropathies dites sensitives. Car à ce jour, aucun traitement n'existe face au Canvas. En attendant, c'est une raison supplémentaire de définitivement considérer la toux chronique comme une maladie. ■ **Sylvie Riou-Milliot**

* Société de pneumologie de langue Française (SPLF), Société nationale française de gastro-entérologie (SNGE), Société française d'oto-rhino-laryngologie (SFORL), Société française de phoniatrie et de laryngologie (SFPL).

Faut-il se laisser tenter par la cuisine coréenne ?

Ces plats asiatiques, composés d'aliments marinés et fermentés, sont très bien équilibrés : ils apportent une bonne source de fibres, de vitamines, de minéraux et d'antioxydants.

Kimchi, **bibimbap**, bulgogi, kimbap… Ces mets emblématiques du pays du matin calme déferlent sur la France, à en voir le nombre de restaurants et d'épiceries qui fleurissent ces dernières années. Certaines marques comme Picard leur consacrent même une gamme de plats préparés. Moins calorique que la cuisine chinoise, plus pimentée que la japonaise, la K-food (ou hansik) a même été reconnue comme « *une cuisine exemplaire nutritionnellement équilibrée* » par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) en 2004. Présentation.

Une alimentation colorée et végétale

Selon la tradition coréenne, cinq couleurs, (vert, rouge, jaune, noir et blanc) dont chacune évoque un élément naturel (respectivement le bois, le feu, la terre, l'eau et le métal) présent dans le yin et le yang, doivent composer un plat. Cette cuisine très colorée apporte ainsi une large part aux légumes frais, sources privilégiées de fibres, de vitamines, de minéraux et d'antioxydants. Pour exemples, la patate douce, pour le jaune, fournit du bêtacarotène (10 500 microgrammes pour 100 g), un antioxydant ; les épinards, pour la couleur verte, sont une bonne source de vitamine K (494 µg/100 g), nécessaire à la coagulation sanguine ; les algues servant à la préparation du kimbap (sushi coréen) pour le noir apportent quantité d'iode et de fer, les champignons comme le shiitaké séché, du zinc (7,66 mg/100 g) ainsi que des vitamines du groupe D (3,9 µg/100 g) (1).

18 %

C'est la progression moyenne annuelle des exportations mondiales de kimchi durant les cinq dernières années. Le nombre de pays importateurs est passé de 61 en 2011 à 89 en 2021.

(SOURCE : MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'ALIMENTATION ET DES AFFAIRES RURALES CORÉEN.)

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

BIBIMBAP Plat très populaire en Corée associant riz, viande de bœuf marinée, légumes sautés, œuf sur le plat, le tout relevé par de la pâte de piment.

PROBIOTIQUES Micro-organismes vivants (bactéries ou levures) dont la consommation exerce un effet bénéfique sur la santé, notamment l'amélioration de la composition du microbiote intestinal.

ACIDE LINOLÉIQUE Acide gras poly-insaturé dit essentiel car l'organisme ne sait pas le fabriquer. Il intervient dans la fabrication de la membrane cellulaire et joue le rôle de précurseur d'hormones.

La fermentation, pilier de la cuisine coréenne

Le kimchi, servi comme accompagnement ou utilisé comme ingrédient culinaire (ragoût, riz frit ou crêpes au kimchi), est préparé à partir de légumes crus (chou principalement, mais aussi carotte, radis blanc (daïkon), navet) marinés et fermentés dans une sauce piquante. Riche en **probiotiques**, sa consommation aiderait à soulager le syndrome du côlon irritable en augmentant l'apport en fibres alimentaires et en réduisant les niveaux de cytokines inflammatoires dans le sang (2). Par ailleurs, selon des travaux menés sur 30 000 adultes, augmenter de 100 g la consommation quotidienne d'aliments fermentés diminuerait la pression artérielle, la glycémie et augmenterait le taux de cholestérol HDL, bon pour le système cardio-vasculaire (3).

Attention au sel

Ce processus de fermentation est également utilisé pour divers condiments traditionnels servant à rehausser ragoûts, soupes, fritures ou légumes assaisonnés (namuls) : la sauce soja (ganjang) ; la pâte de soja (doenjang), à base de piment rouge, de soja, de farine de riz gluant et de germe de blé ; la pâte de haricots noirs (chunjang) servant à la préparation des nouilles jajangmyeon, ou bien encore une pâte de piment rouge (gochujang) utilisée dans le tteokbokki (gâteau de riz épicé).

Toutefois, certains de ces condiments tels que la sauce et la pâte de soja sont particulièrement riches en sodium (4) qui, consommé en excès, peut augmenter la pression artérielle. La sauce soja coréenne de la marque Sempio affiche ainsi 2 g de sel pour seulement une cuillère à soupe de 15 ml (5), là où l'OMS recommande de ne pas dépasser les 5 g par jour.

Très peu de matières grasses

La principale huile utilisée, aussi bien crue que pour la cuisson, est celle de sésame. Elle est composée essentiellement d'acides gras mono-insaturés (dont l'acide oléique) et poly-insaturés dont **l'acide linoléique** ou oméga 6, qui lui confère des propriétés cardio-protectrices (hypolipidémique, anti-athérogène) et anti-inflammatoires (6). L'huile de sésame est aussi une source de composés phénoliques antioxydants tels que les lignanes (sésamol, sésamoline, etc.). Et fournit des vitamines E (1,1 mg/100 g) et K (13,6 µg/100 g).

Le thé plutôt que les boissons alcoolisées

Mieux que le soju, une boisson alcoolisée à base de riz et de patate douce, le thé, notamment à l'orge ou au ginseng, est très apprécié des Coréens. Pour ce dernier, ses ginsénosides, des composés présents dans les racines, les tiges et les feuilles de la plante renforceraient le système immunitaire (7) et auraient un effet hypoglycémiant. Le lait à la banane et le jus d'aloe vera sont aussi des boissons très prisées. Issu de la pulpe, le jus d'aloe vera, source d'antioxydants, est disponible sous forme de bouteille prête à l'emploi, mais il doit être dépourvu d'aloïne, un puissant composé laxatif naturel. ■

Sylvie Boistard

PHILIPPE GÉRARD Directeur de recherche à l'Inrae de Jouy-en-Josas (Yvelines)*

Les nombreux bénéfices de la fermentation

« Les bactéries présentes dans les produits fermentés produisent des molécules anti-inflammatoires, des polyphénols et des acides gras à chaîne courte aidant au maintien d'une muqueuse colique saine. La teneur en vitamines est également supérieure dans les aliments fermentés et leurs nutriments sont rendus plus digestes grâce au travail des bactéries. La fermentation a aussi des effets antimicrobiens en aboutissant à la production d'acides qui vont diminuer le pH intestinal et empêcher les bactéries pathogènes de s'implanter. »

* Contributeur de l'ouvrage *Microbiote intestinal et santé humaine*, Elsevier Masson, 2021.

(1) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(2) Kimchi improves irritable bowel syndrome: results of a randomized, double-blind placebo-controlled study, Kim H.Y. et al, *Food & Nutrition Research*, 2022.

(3) Positive Health Outcomes Associated with Live Microbe Intake from Foods, Including Fermented Foods, Assessed using the NHANES Database, Hill C. et al, *The Journal of Nutrition*, 2023.

(4) Sodium and potassium intake patterns and trends in South Korea, Lee H. S. et al, *Journal of human hypertension*, 2013.

(5) Open Food Facts.

(6) Food and nutraceutical functions of sesame oil : an underutilized crop for nutritional and health benefits, Langyan S. et al, *Food Chemistry*, 2022.

(7) Panax Ginseng, Kiefer D. et al, *American Family Physician*, 2003.

Gaza
Le patrimoine anéanti

Mosquée ottomane, vestiges d'un port grec, cimetière romain, église byzantine… Le petit territoire palestinien abritait un riche patrimoine archéologique et culturel qui disparaît sous les bombardements de l'armée israélienne en réplique aux attentats du 7 octobre dernier. Quelques archéologues encore sur place témoignent de cette destruction massive.

Par Sylvie Briet

MAHMOUD ISSA / ALAMY / HEMIS.FR - AFP

C'est l'autre tragédie de Gaza : la destruction de son patrimoine historique, archéologique, culturel. Depuis le 7 octobre dernier et les attentats meurtriers commis par le Hamas, la réplique israélienne provoque chaque jour de nouveaux morts, majoritairement des femmes et des enfants. Les maisons, les écoles, les hôpitaux, les bâtiments administratifs sont détruits. Il faut y ajouter une grande partie de l'histoire de Gaza qui disparaît sous les bombardements.

On le sait peu, mais l'enclave palestinienne a un passé très riche, idéalement située entre Asie, Afrique et Europe. Tous les grands empires s'y sont succédé et y ont laissé des traces, et ce depuis les premiers pharaons dès 3500 ans avant notre ère. Elle fut ensuite la capitale des Philistins, ces peuples de la mer qui s'établirent sur la côte méditerranéenne au XII^e siècle avant J.-C. Puis, les Assyriens, les Babyloniens, les Perses, les Grecs, les Romains, les Byzantins l'occupèrent tour à tour jusqu'à la conquête musulmane en 635. Les Mamelouks la contrôlèrent au XIII^e siècle, et de 1516 à 1917 elle fut intégrée dans l'Empire ottoman, à l'exception de deux courtes périodes. Elle demeura la plupart du temps une puissante cité commerçante, célèbre pour ses jardins et ses puits.

Aujourd'hui, c'est son passé ottoman qui subit le plus de dommages : les bâtiments emblématiques de la vieille ville sont réduits en tas de pierres : le hammam al-Samara, dernier bain turc de l'enclave, les vieilles demeures si difficilement rénovées, les mosquées anciennes comme la grande mosquée al-Omari, qui témoignait du mélange des religions au Moyen-Orient. Elle fut construite sur les ruines d'une église élevée au XII^e siècle, remise à Saladin en 1187 qui la réaménagea en mosquée. Il se peut même qu'elle ait été une synagogue durant l'époque romano-byzantine, des inscriptions en hébreu ayant été trouvées sur un des piliers. Pilonnée le 8 décembre dernier, il n'en reste pas grand-chose si ce n'est le minaret décapité.

Les quatre principaux musées ont été détruits, celui de Khan Younès ouvert en 2016, celui de Rafah, détruit par un tir aérien dès le 11 octobre, le palais al-Basha, construit par un sultan mamelouk au XIII^e siècle, et al-Mathaf, le musée de Jawdat al-Khoudary dont *Sciences et Avenir* avait parlé lors de sa création *(lire* S. et A. *n° 770,*

▲ **La grande mosquée al-Omari,** symbole du pluralisme religieux au Moyen-Orient, a été pilonnée le 8 décembre 2023 (à gauche en 2022, à droite le 5 janvier dernier).

avril 2011). Cet entrepreneur de travaux publics, qui découvrait des antiquités à chaque coup de pelleteuse, s'était pris de passion pour l'archéologie : il collectionnait ses découvertes et voulait que les habitants en profitent. Ses propos d'alors résonnent tristement : *« Je veux montrer que ce pays n'est pas le symbole du terrorisme, de l'ignorance, nous sommes détenteurs d'une riche civilisation. »* Aujourd'hui, il a publié des photos de son musée, détruit comme son jardin qui fut un havre de paix dans lequel colonnes byzantines, chapiteaux, jarres dialoguaient avec les figuiers et les cactus.

Des fouilles françaises menées sur place depuis des années

Le sort des sites archéologiques est moins bien connu car il est très difficile de s'y rendre sans risquer sa vie. Situation d'autant plus inquiétante que Gaza est un immense champ archéologique dont le sous-sol recèle les témoins de toutes les civilisations : sarcophages anthropomorphes égyptiens, poteries philistines, céramiques grecques, mosaïques byzantines…

Depuis des années, les Français étaient les seuls étrangers à mener des fouilles à Gaza, certes interrompues et chaotiques à partir de 2007 et l'arrivée au pouvoir du Hamas. Avant cela, en 1993, aux lendemains des accords d'Oslo, le père dominicain, Jean-Baptiste Humbert, aujourd'hui âgé de 84 ans et archéologue à l'École biblique et archéologique française (Ebaf) de Jérusalem, avait commencé à travailler avec le chef des Antiquités de l'Autorité palestinienne notamment à Blakhiyah, en bord de mer, mettant au jour l'ancien port d'Anthédon, un port grec actif de 800 avant J.-C. à 1100 de notre ère, point économique et social important sur la route entre l'Europe et le Levant. Le site figurait sur la liste indicative pour une nomination au patrimoine mondial de l'Unesco. Ses vestiges étaient déjà invisibles, recouverts de sable, endommagés par l'érosion, mais on distingue désormais sur les photos un cratère récent, trace d'un bombardement.

En 2022, Anthédon était revenu sur le devant de la scène archéologique avec la découverte de sa nécropole romaine. Lors d'un programme de construction d'immeubles, les pelles mécaniques avaient mis au jour des tombes romaines et un jeune influenceur de Gaza s'était filmé dans un trou, alertant sur la démolition. Sa vidéo fit le buzz et la population mit la pression sur le service des Antiquités qui accepta de geler 3 500 m^2. Et de confier les fouilles à l'ONG Première Urgence internationale (PUI) qui mène depuis 2018 un programme appelé « Intiqal » visant à sauvegarder, restaurer, restituer au public plusieurs sites archéologiques de Gaza tout en développant une activité socio-économique autour du patrimoine.

L'église byzantine de Jabaliya et le monastère Saint-Hilarion, qui accueillait 900 jeunes visiteurs par mois avant le 7 octobre, ont profité de ce programme. Financé par le British Council, la fondation Aliph et l'Agence française de développement (AFD), il a également permis la formation d'étudiants. Il est mené sur place par Jihad Abou Hassan, coordinateur terrain de PUI, et René Elter, archéologue, arrivé à Gaza en 1999 pour aider Jean-Baptiste Humbert et

MUSÉE AL-MATHAF

Le musée al-Mathaf

Le musée créé en 2008 par Jawdat al-Khoudary, un entrepreneur en BTP de Gaza devenu collectionneur d'antiquités, a été entièrement détruit, tout comme son jardin, qui contenait lui aussi de nombreux chapiteaux et colonnes grecs ou byzantins. En 2007, une partie de ses collections a fait l'objet d'une exposition à Genève, « Gaza à la croisée des civilisations ». Elle est restée dans un complexe de stockage sur les bords du lac Léman, attendant de meilleures conditions de sécurité dans l'enclave palestinienne. Ce qui n'est jamais advenu.

Le cimetière romain

Au milieu d'immeubles détruits, des étudiants formés par Première Urgence internationale, habitant toujours près de Jabaliya, ont profité d'une accalmie début février pour aller voir l'état du cimetière romain sur lequel ils travaillaient. Ils récupèrent ici des artefacts mis au jour durant la fouille, des outils et du matériel *(photo ci-dessous)*. Sur ce site qui a révélé 150 tombes romaines, seuls les baraquements de chantier avaient été démolis par les bulldozers. En revanche, il ne reste rien, semble-t-il, du site d'Anthédon, l'ancien port grec, non loin de là.

PJI

BRUNO BOURGEOIS

MAJDI FATHI/NURPHOTO/AFP

L'église de Jabaliya

L'église byzantine, construite en 444 et située près du camp de réfugiés de Jabaliya, possède de superbes mosaïques représentent des animaux, des scènes de chasse, des palmiers, décorés de textes écrits en grec ancien datant de l'empereur Théodose II, à la tête de l'Empire byzantin entre 408 et 450. Le site accueillait du public avant le 7 octobre. Le bâtiment, construit au-dessus des vestiges de l'église par René Elter et son équipe, a été abîmé par des tirs mais n'est pas tombé. Les mosaïques n'étaient, semble-t-il, pas détruites mi-février.

revenu régulièrement depuis. Présent à Gaza le 7 octobre, il a été rapatrié en France trois semaines plus tard : *« Ce cimetière romain n'a jamais été pillé, l'ensemble des artefacts liés aux rites funéraires y a été conservé,* explique-t-il. *Nous y avons mis au jour 150 tombes. Il nous restait deux semaines de fouilles et nous avions terminé ! Pour le moment, les dégâts connus se limitent aux installations de chantiers et au matériel de fouille écrasés par un bulldozer. Mais le plus important pour moi est de protéger mon équipe qui représente l'avenir. »*
Une profonde inquiétude a entouré le sort de l'entrepôt archéologique situé dans la ville de Gaza. Il contient le résultat de 28 années de fouilles conduites par l'Ebaf, puis par l'équipe de Première Urgence. Les étages supérieurs de l'immeuble ont été bombardés. Le local situé au rez-de-chaussée n'est pas touché mais dans la semaine du 14 au 20 janvier, des soldats israéliens s'y sont filmés dans une vidéo accompagnée du commentaire *« Wow ! »*. Des rumeurs de pillage ont ensuite circulé, démenties par l'autorité des Antiquités d'Israël (IAA) qui nous a répondu : *« Aucun objet n'a été pris par l'IAA. Les réserves appartiennent aux Français qui ont mené les fouilles sous la responsabilité de l'École biblique. L'IAA a offert de transférer les objets du local de Gaza à l'École biblique et archéologique de façon temporaire pour les protéger. »* La France, par la voix de l'Ebaf, a demandé aux Israéliens d'assurer sur place la sécurité de ce dépôt.

Des vestiges témoins de la cohabitation des religions

En voyant la vidéo des soldats israéliens à l'intérieur du dépôt dont il est le gardien, Fadel al Atol était paniqué, craignant que ne soient saccagées ces reliques à la valeur scientifique inestimable pour son pays. Né dans le camp de réfugiés d'al-Shati, il avait 13 ans lorsqu'il a rencontré des archéologues français de l'Ebaf qui fouillaient un site. Il leur a

PUI

3 QUESTIONS À

RENÉ ELTER

ARCHÉOLOGUE, COORDINATEUR SCIENTIFIQUE DU PROGRAMME INTIQAL, CHERCHEUR ASSOCIÉ À L'ÉCOLE BIBLIQUE ET ARCHÉOLOGIQUE FRANÇAISE DE JÉRUSALEM

« Le 7 octobre, tout s'est arrêté »

Vous étiez à Gaza le 7 octobre dernier, qu'y faisiez-vous ?
Je sortais de chez moi vers 6 h 30 pour me rendre sur le chantier du cimetière romain au nord de Gaza. Des fouilles que je mène avec l'équipe Intiqal pour le compte de l'ONG Première Urgence internationale (PUI) sous le contrôle scientifique de l'École biblique et archéologique de Jérusalem. Au moment où j'ai ouvert la porte, des roquettes sont parties de partout, c'était surréaliste, une énorme pieuvre s'élevait au-dessus de Gaza. J'ai alors téléphoné à mes collègues. Fadel, responsable du chantier, était déjà sur place pour enlever les bâches et protections. Nous avions travaillé tout le vendredi 6 octobre pour préparer les relevés photogrammétriques du site. À ce moment, nous n'avions aucune notion de ce qui se passait, seul le danger planait. Je leur ai dit de remettre les bâches sur les vestiges et de rentrer chez eux. À partir de là, tout s'est arrêté.

Comment avez-vous constitué votre équipe ?
Dans le cadre du programme Intiqal 2030 mené par PUI, nous avons formé une équipe de jeunes diplômés en archéologie et en architecture à différentes disciplines : taille de la pierre, restauration de maçonneries anciennes, pavements, d'enduits peints… Dans ce programme, nous avons appliqué la parité filles-garçons, un élément très important à Gaza car il n'y avait pas de filles sur les chantiers archéologiques. Nous avons formé environ 130 jeunes depuis 2018 et aujourd'hui, nous travaillons avec 20 garçons et 10 filles, tous professionnels, chacun représentant un maillon d'une chaîne. Ils ont réussi à former une équipe mixte et solidaire. Et ce alors que la notion d'équipe est quasi inexistante à Gaza du fait de la situation. La loi du plus fort règne.

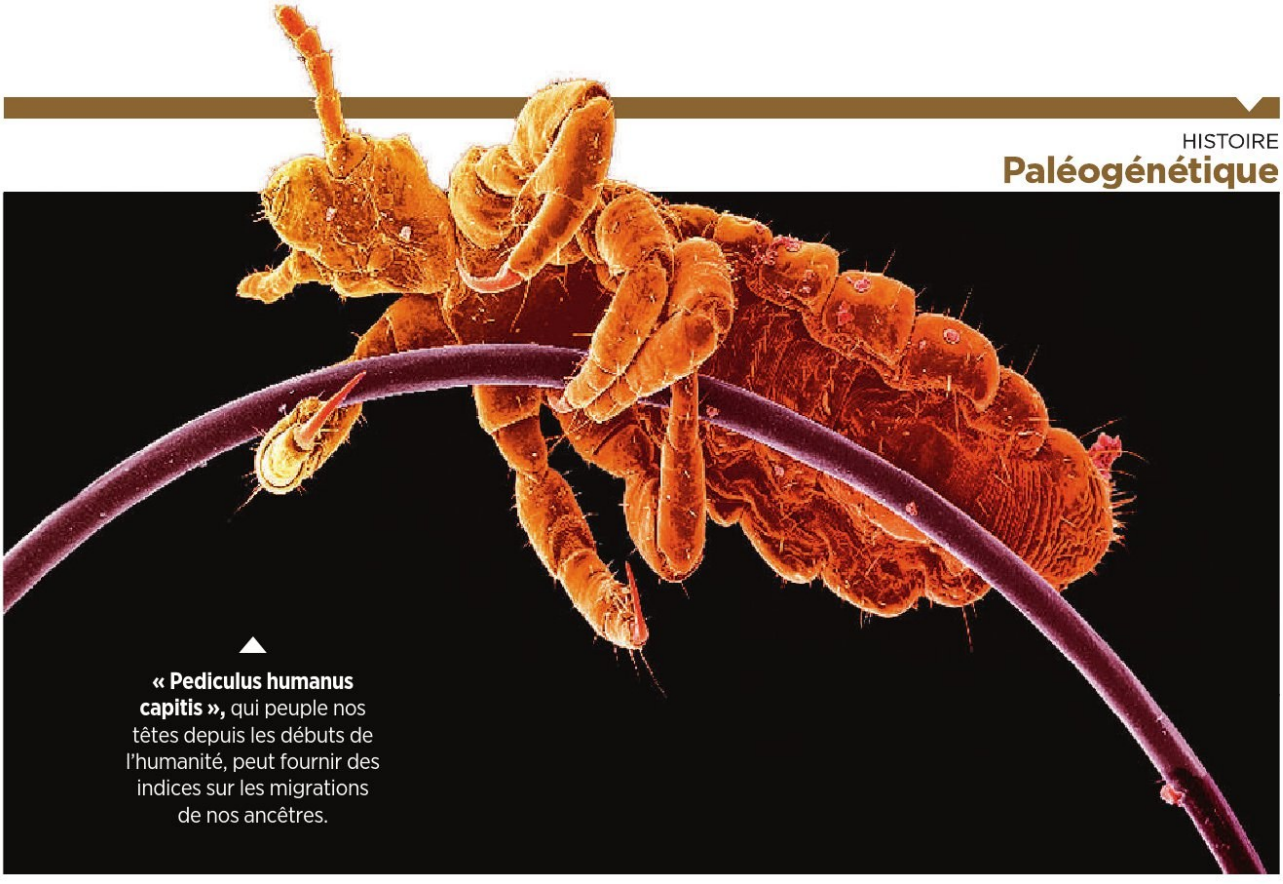
> « Nous avons formé environ 130 jeunes depuis 2018 et aujourd'hui, nous travaillons avec 30 professionnels »

Comment peuvent-ils envisager l'avenir ?
À la veille du 7 octobre, certains dégageaient des tombes, d'autres fouillaient des squelettes, d'autres tamisaient, triaient, lavaient, inventoriaient, faisaient des relevés en photogrammétrie. Toute la chaîne opératoire nécessaire à la compréhension d'un site fonctionnait. Aujourd'hui, réfugiés dans le Sud pour la plupart, ils rêvent tous de reprendre le « boulot ». PUI a pu maintenir leurs salaires. Leurs maisons sont détruites mais ils s'inquiètent davantage pour les sites. C'est leur vie. ■ **Propos recueillis par S. B.**

demandé du travail et ils l'ont recruté en 1997. Formé par le père Jean-Baptiste Humbert, il est devenu le référent de nombreux sites à Gaza. Il a appris le français au cours de stages suivis en France. Il a gravi tous les échelons et quand René Elter n'est pas sur place, il assure la responsabilité des chantiers. Âgé de 42 ans, père de cinq enfants, Fadel est réfugié dans une maison dans le Sud (son habitation a été entièrement détruite) où il vit avec sa famille et des étudiants formés et salariés par Première Urgence, soit une quarantaine de personnes entassées dans des conditions précaires. Joint par téléphone à Gaza, il tient néanmoins à parler d'archéologie : *« Au monastère Saint-Hilarion, les toits, les passerelles que nous avions construits ont été détruits. Nous espérons que les mosaïques en dessous sont intactes. Je ne comprends pas ces destructions : ces vestiges montrent que les religions ont cohabité. C'est triste, c'est triste… »*

« Une volonté délibérée d'effacer l'histoire »

Tous ces vestiges auraient pourtant dû être protégés : la convention internationale de La Haye de 1954, signée par Israël et la Palestine, stipule qu'en cas de conflit armé, il faut assurer la sauvegarde et la protection des biens culturels. Pour Marc-André Haldimann, ancien conservateur du musée d'Art et d'Histoire de Genève, bon connaisseur de Gaza, *« il y a de la part des Israéliens une volonté délibérée d'effacer l'histoire, alors que la vieille ville et ses monuments phares ont été pulvérisés »*. En 2007, il avait organisé à Genève une importante exposition sur le patrimoine de Gaza avec 530 objets, dont la moitié provenait de l'Autorité palestinienne et l'autre moitié des collections particulières de Jawdat al-Khoudary. Et c'est peut-être une chance : ces pièces montrées également à Oldenburg (Allemagne) et Stockholm (Suède) sont restées à Genève depuis. Au moins ne sont-elles pas sous les gravats. ■



« Pediculus humanus capitis », qui peuple nos têtes depuis les débuts de l'humanité, peut fournir des indices sur les migrations de nos ancêtres.

S. GSCHMEISSNER/SPL/SUCRÉSALÉ

Les poux réécrivent l'histoire de l'humanité

L'étude génétique de ces parasites permet aux chercheurs de retracer les migrations humaines qui ont façonné l'histoire de notre espèce et d'apporter des informations inédites.

Indésirables ? Les poux sont pourtant de plus en plus recherchés par les scientifiques. Ils renfermeraient des informations sur les contacts entre les populations humaines, présentes ou passées. Ce parasite — qui ne vit pas plus de 48 heures hors de nos cheveux — nous accompagne en effet depuis les débuts de l'humanité. Cela fait 25 millions d'années que des poux ont colonisé les primates, et chaque espèce est spécifique de son hôte : les poux humains n'infectent pas les chimpanzés. *Pediculus schaeffi* et *Pediculus humanus* ont divergé il y a 5,6 millions d'années, en même temps que la lignée humaine et celle des chimpanzés et bonobos. Pourraient-ils alors nous apporter des informations inédites sur l'histoire de l'humanité ? Des chercheurs viennent de le prouver.

« Lorsque les premiers humains ont quitté l'Afrique, ils ont emporté leurs poux avec eux. Lorsqu'ils ont peuplé le reste du monde, les poux les ont accompagnés », résume Marina Ascunce, biologiste au ministère de l'Agriculture des États-Unis (USDA). Cette spécialiste des insectes invasifs a étudié la génétique des poux pour retracer les migrations humaines. *« Avec mes collè-*

gues, nous pensons que l'histoire généalogique des poux et celle des humains concordent », poursuit-elle. C'est ainsi qu'elle retrouve l'arrivée des Européens en Amérique dans la génétique de 274 poux actuels. Ses recherches, publiées dans la revue *PLoS One*, comparent le génome de poux provenant de 25 sites et 19 pays différents, d'Europe, d'Asie et de plusieurs pays américains comme les États-Unis, le Mexique et l'Argentine. Avec une réserve : un seul pou prélevé en Afrique a été étudié. *« C'est le même genre de biais que l'on voit avec les études humaines ; elles négligent l'Afrique alors qu'on y trouve une si grande diversité* », remarque Andrew Sweet, un spécialiste de la génétique des poux à l'université d'État de l'Arkansas (États-Unis), qui n'a pas contribué à ces travaux.

Les analyses de Marina Ascunce et ses collaborateurs montrent l'existence de deux populations de poux distinctes

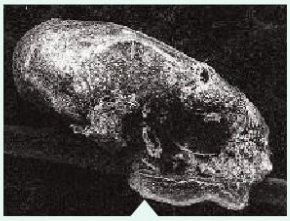
PALÉOANTHROPOLOGIE

Un gisement d'ADN ancien

Petits témoins privilégiés de l'histoire humaine, mais aussi banques de sang ancien ? Un peu comme le moustique celé dans l'ambre a permis de faire renaître des dinosaures dans le film *Jurassic Park*, les poux anciens contiennent encore de l'ADN exploitable, et c'est un autre volet émergeant des recherches sur l'histoire humaine à travers les poux. Il faut savoir que la glue, qui attache les lentes — les œufs du parasite — aux cheveux, constitue un excellent conservateur d'ADN. En 2021, une équipe de scientifiques du Royaume-Uni, du Danemark et d'Argentine ont découvert du sang humain dans une lente attachée au cheveu d'une momie andine, vieille de 2000 ans. L'ADN humain contenu dans la lente correspond à ce que l'on sait de la momie : il appartient à un homme ayant migré du nord de l'Amazonie vers le centre de l'actuelle Argentine. L'ADN du bébé pou fossilisé confirme le parcours de migration. Les histoires évolutives concordent.

Mikkel Winther Pedersen, de l'institut Globe de l'université de Copenhague (Danemark), et premier auteur de l'étude, s'en étonne toujours : *« La quantité élevée d'ADN humain obtenue à partir de ces ciments de lentes nous a vraiment surpris ! J'ai été frappé par le fait que de si petites quantités pouvaient encore nous donner toutes ces informations sur l'identité des personnes.* » Ces parasites pourraient donc fournir de l'ADN même lorsque les restes humains sont trop dégradés pour être analysés. Le plus vieux pou connu à ce jour provient d'un crâne humain âgé de 10 000 ans découvert au Brésil en 2000. Aurait-on dans nos musées un gisement inexploité d'ADN humain ancien ? La chasse aux poux de momies est ouverte.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN



A. ARAÚJO ET AL.

Des lentes ont été retrouvées sur cette momie andine de 2000 ans d'âge (à gauche) ou sur des restes humains vieux de 10 000 ans provenant d'un site archéologique au Brésil (ci-dessus).

sur le plan génétique : la première a été trouvée sur les têtes d'humains d'Asie et la seconde en Europe. Quant aux poux prélevés sur les Américains ? Ils sont soit européens, soit asiatiques, soit hybrides… Ces derniers représentent 12 % des poux étudiés et 75 % d'entre eux proviennent du continent américain. « *Ce que nous interprétons comme un signal de contact entre les Européens et les Amérindiens* » précise la biologiste.

Une hybridation entre poux américains et européens

Pour dater cet événement, la chercheuse et ses collègues ont utilisé un algorithme qui mesure la vraisemblance de plusieurs hypothèses de rencontre. En génétique, la question du « quand ? » est souvent probabiliste. Et ici, le modèle le plus probable, en supposant que les poux se reproduisent tous les 36 jours, montre une hybridation au moment où les Européens ont colonisé le continent américain, au XVe siècle. Démonstration est faite : on peut lire la grande histoire humaine dans des petits parasites suceurs de sang. Autre spécialiste de la génétique des poux indépendant de ces recherches, Kevin Johnson, qui travaille à l'université de l'Illinois (États-Unis), abonde : « *La découverte de deux grands groupes de poux est tout à fait intéressante. Ils se mélangent dans le Nouveau Monde et cela semble correspondre aux schémas de migration humaine.* »

Certes, cette étude ne constitue encore qu'une preuve de la pertinence d'analyser la génétique des poux pour étudier l'histoire humaine. Mais en accroissant le nombre d'échantillons et la profondeur des analyses, les scientifiques gagneront en précision et pourront alors peut-être voir des événements moins bien documentés. Les migrations humaines ont façonné l'histoire de notre espèce et des pans entiers de celle-ci restent mal connus, en particulier dans le continent africain et avant l'invention de l'écriture. « *Nous avons maintenant recueilli davantage d'échantillons venant d'Afrique. Nous sommes en train de les inclure pour une analyse sur le génome entier dans une prochaine étude* », nous confie Marina Ascunce.

MARIE DE GRACIA COQUEREL

« Il est possible que les poux des néandertaliens et peut-être d'autres homininés disparus soient toujours présents »

Marina Ascunce, biologiste au ministère de l'Agriculture des États-Unis (USDA)

Parallèlement, les poux pourraient nous livrer des éléments de notre passé d'une autre manière. En 2010, le généticien du musée d'Histoire naturelle de Floride (États-Unis) David Reed, qui a participé à l'étude de Marina Ascunce, a cherché à calculer le moment où ont divergé les poux de tête et les poux de corps — ceux qui attachent leurs lentes aux vêtements et non aux cheveux (à ne pas confondre avec les poux de pubis, dit morpions en langage familier, qui constituent une autre espèce). « *Les poux de corps et ceux de tête ne présentent pas beaucoup de différences génétiques* », explique Marina Ascunce.

Déterminer l'âge précis des premiers vêtements

Seule caractéristique notable : les poux de tête sont deux fois plus petits que les poux de corps. David Reed espérait ainsi préciser la date des premiers vêtements. Une question difficile en paléoanthropologie car les peaux dont se couvraient nos ancêtres ne fossilisent pas. Les scientifiques pensent qu'ils ont été inventés lorsque les populations humaines ont migré vers des milieux plus froids, c'est-à-dire après la sortie d'Afrique d'*Homo erectus il* y a 1,8 million d'années. C'est peut-être *Homo antecessor* qui a « lancé la mode » il y a 800 000 ans, période de glaciation durant laquelle il vivait déjà sur le continent européen, ou encore Neandertal.

La seule chose dont les paléoanthropologues sont sûrs, c'est que leur usage était répandu, il y a 40 000 ans, période à laquelle on date les plus anciennes aiguilles à coudre.

David Reed propose que la préférence de localisation entre la tête ou le corps résulte justement de l'invention des vêtements. Dans son étude, il compare quelques gènes, très bien conservés dans l'évolution, de poux de tête actuels à ceux de poux de corps ainsi que d'un pou de chimpanzé, qui constitue ici un point de référence à l'extérieur de groupe étudié. Cet influent généticien américain estime que les deux groupes se sont séparés il y a entre 83 000 et 170 000 ans, une période cohérente avec l'apparition des premiers vêtements. Une analyse plus fine pourrait permettre de réduire encore la fenêtre probable pour cette invention cruciale de l'histoire de l'humanité. « *Mais c'est un sujet très débattu dans la "communauté des poux"* » avertit Marina Ascunce.

Les poux peuvent-ils nous raconter des histoires encore plus anciennes ? C'est ce que pensent les spécialistes. Même Neandertal avait des poux ! On pense qu'ils étaient différents de ceux d'*Homo sapiens*, même si aucun spécimen n'a encore été découvert. « *Il est également possible que les poux des néandertaliens et peut-être d'autres homininés disparus soient toujours présents* », estime Marina Ascunce. Ces poux archaïques auraient-ils pu se lier avec *Homo sapiens* en conservant dans leur génome les traces de leurs précédents hôtes humains ? Il reste à mettre la main sur ce trésor de parasite. ■

Agnès Vernet

La Terre prend de l'âge

Les savants du siècle des Lumières exercent leur sagacité sur une question qui n'avait jusqu'alors trouvé de réponses que dans les mythes et la religion : l'âge de notre planète. Buffon innove en engageant une démarche scientifique fondée sur l'expérimentation du refroidissement des métaux.

Par Denis Guthleben

Paris, 1774. Le premier volume de suppléments à l'*Histoire naturelle, générale et particulière* rédigée par Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon, sort des presses de l'Imprimerie royale. Les exemplaires sont vite épuisés : l'œuvre colossale que Buffon a commencé à publier vingt-cinq ans plus tôt réunit un lectorat fidèle, presque autant que l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert (parue à partir de 1751). Un texte retient l'attention : « Expériences sur le progrès de la chaleur dans les corps ». Sous ce titre général, le savant révèle les travaux qui lui ont permis d'estimer l'âge de la Terre. C'est un tournant : pour la première fois, une démarche scientifique basée sur l'expérimentation est appliquée à une question qui n'avait jusqu'alors trouvé l'essentiel de ses réponses que dans les mythes et la religion.

Certes, avant lui, cette question n'a pas été soulevée avec le même empressement à toutes les époques ni sous toutes les latitudes. Un exemple parmi les plus notoires : la Terre qu'Aristote envisageait « *au centre et immobile* » dans son traité *Du ciel*, existait aussi selon lui de toute éternité… Or, pour qu'il y ait âge, il faut qu'il y ait d'abord naissance, ou plutôt ici création. Dans ce registre, les religions dites du Livre, c'est-à-dire les trois monothéismes que sont le judaïsme, le christianisme et l'islam, ont établi un cadre dont il a longtemps mieux valu ne pas s'écarter. Le récit biblique de la *Genèse* révèle ainsi que la Terre a été conçue par Dieu « *le premier jour* », en même temps que les cieux et juste avant la célèbre injonction à ce « *que la lumière soit* ».

CYRIL FRÉSILLON/ CNRS PHOTOTHÈQUE

Historien des sciences, Denis Guthleben est directeur délégué du Comité pour l'histoire du CNRS.

Newton défendait l'idée d'une création du monde en… -3998

Ce « *premier jour* » reste toutefois une notion vague dès lors qu'on souhaite le transposer d'un agenda divin à un calendrier plus humain. Au fil des siècles, bien des savants s'y sont essayés, puisant dans les Écritures elles-mêmes les indications permettant de rétablir la longue suite des événements depuis la création. Sachant par exemple qu'Adam est mort à l'âge de 930 ans, ou encore que Noé était âgé de 600 ans quand survint le déluge, il devient possible d'établir une chronologie. La palme de la précision revient ici à James Ussher, archevêque d'Armagh et primat d'Irlande, dans les *Annales de l'Ancien Testament, retracées depuis l'origine du monde* qu'il a publiées en 1650. Le théologien a été en mesure d'établir cette origine au 23 octobre de l'an 4004 avant notre ère — un dimanche, soit le premier jour de la semaine, le samedi étant le dernier, dédié au repos…

Tome I. P. 185.

185

PREUVES
DE LA
THÉORIE DE LA TERRE.

ARTICLE I.

De la formation des Planètes.

NOTRE objet étant l'Hiſtoire Naturelle, nous nous diſpenſerions volontiers de parler d'Aſtronomie ; mais la Phyſique de la terre tient à la Phyſique céleſte, & d'ailleurs nous croyons que pour une plus grande intelligence de ce qui a été dit, il eſt néceſſaire de donner quelques idées *générales* ſur la formation, le mouvement & la figure de la Terre & des Planètes.

La Terre eſt un globe d'environ trois mille lieues de diamètre, elle eſt ſituée à *trente* millions de lieues du Soleil, autour *duquel* elle fait ſa révolution en trois cents ſoixante-*cinq* jours. Ce mouvement de révolution eſt le réſultat de

Première page du texte « Preuves de la théorie de la Terre », au tome 1 de l'« Histoire naturelle » de Buffon.

Une telle exactitude peut bien sûr prêter à sourire aujourd'hui. Mais ce serait omettre qu'une partie non négligeable de la population mondiale y croit toujours dur comme fer. Et ce serait aussi et surtout commettre le crime capital en histoire, celui d'anachronisme, en jugeant l'environnement intellectuel et les croyances de nos ancêtres à l'aune de nos propres certitudes. Sans oublier, en prime, que d'immenses savants ont donné foi à de telles démonstrations, à l'image de Newton qui défendait l'idée d'une création en -3998. Chemin faisant, et en dépit de soutiens aussi illustres, le bel édifice a subi des lézardes. Les objections des géologues aux XVII^e^ et XVIII^e^ siècles, notamment, ne manquaient pas de bon sens. Les processus d'érosion s'inscrivaient à l'évidence dans des durées bien supérieures à une poignée de millénaires : comment expliquer sinon que le lit du Gard, en France, par exemple, s'est tant creusé de la création du monde à l'établissement de l'Empire romain, et aussi peu depuis la construction du fameux pont-aqueduc qui l'enjambe ? Dans ce domaine, les effets du déluge biblique étaient de moins en moins admis comme l'explication principale, voire unique, aux reliefs : dès l'aube du XVI^e^ siècle, Léonard de Vinci leur avait déjà porté des coups de patte dans son *Codex Leicester*, en relatant les observations stratigraphiques qu'il avait faites dans les Alpes jusqu'en 1499.

Avec les Lumières, le moment paraît venu de les terrasser, et Buffon plante la première banderille. Postulant que la Terre était à l'origine un morceau détaché du Soleil, donc extrêmement chaude, puis qu'elle s'était refroidie au fil des temps, il examine les durées de refroidissement de *« dix boulets de fer forgé et battu »* de tailles variables, allant d'un demi-pouce à cinq pouces de diamètre, et extrapole les résultats aux dimensions de notre planète. Pour ses expériences, Buffon a privilégié un fer sorti des forges de Châtillon-sur-Seine, ainsi qu'il le révèle dans son *Histoire naturelle*. Et ses résultats sont sidérants, allant, selon les calculs et les matériaux qu'il adjoint au fer, de quelques dizaines de milliers à plusieurs millions d'années ! Évidemment, il est aisé de contester *a posteriori* la démarche de Buffon, tant dans son postulat que dans sa méthode. Il n'empêche que le « Pline de Montbard » a ouvert grand les portes d'un nouvel entendement et d'un nouveau mode de détermination de l'âge de la Terre, bâtis sur l'expéri-

Avec les Lumières, le moment paraît venu de terrasser l'explication biblique, et Buffon plante la première banderille

PIERRE THOMAS, 2012

mentation et décorrélés des Écritures… au moins autant que faire se peut ! Car si les Lumières se prêtent aux hypothèses inédites, une certaine prudence s'impose encore. Parmi tous les âges auxquels ses études ont abouti, Buffon recommande donc de privilégier le plus restreint, qui diffère certes des textes religieux mais dans une proportion qu'il estime acceptable, soit 74 817 ans. Au XIXe siècle, les savants n'ont pas manqué de théories et d'idées nouvelles pour étendre l'âge de la Terre comme le préconisait Buffon. Poursuivant dans sa lignée tout en s'appuyant sur les principes de propagation de la chaleur établis à partir des travaux de Charles Fourier dans les années 1820, les physiciens ont ainsi suscité un saut d'échelle : la Terre pouvait être âgée de 20 à 400 millions d'années, une estimation large dans laquelle lord Kelvin (William Thomson), fort de l'autorité qu'il avait acquise notamment et précisément dans le champ de la thermodynamique, finit par suggérer au soir du XIXe siècle de retenir l'hypothèse la plus basse, entre 20 et 40 millions d'années.

Sauf que cette fourchette-là n'était déjà plus du goût des géologues, ni d'une partie des naturalistes rangée alors derrière la théorie de l'évolution. Les uns comme les autres étaient aux prises avec des phénomènes, géologiques d'un côté, biologiques de l'autre, exigeant selon eux des durées au moins dix fois supérieures — des centaines de millions d'années pour expliquer la formation des reliefs selon Charles Lyell, au moins 300 millions pour englober la sélection naturelle selon Charles Darwin… autant d'objections infondées aux yeux de lord Kelvin, qui avait beau jeu d'opposer aux estimations de ses éminents confrères la rigueur des lois physiques et des calculs mathématiques sur lesquels il s'était fondé, en ignorant toutefois à l'intérieur d'une planète qu'il supposait entièrement solide le rôle énorme des mouvements de convection dans les transports de chaleur vers la surface.

AKG IMAGES

Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon (1753-1788).

La découverte de la radioactivité marque un tournant

Mais patience et longueur de temps font plus que force ni que rage ! La solution va peu à peu émerger d'un nouveau champ de recherche : la radioactivité. Elle est découverte par Henri Becquerel en 1896, étudiée avec acharnement et passion par Marie et Pierre Curie en France et par un nombre croissant de scientifiques à travers le monde. Ses propriétés ne tardent pas à intéresser les géologues : en 1913, reprenant une piste explorée par Ernest Rutherford et Frederick Soddy dix ans plus tôt, Arthur Holmes suggère d'utiliser les rapports de quantité entre les éléments radioactifs « pères » et « fils », les seconds résultant de la désintégration des premiers, comme un chronomètre permettant de dater des roches. La radiochronologie est née, et certains échantillons donnent vite le tournis aux savants : leur âge dépasse allègrement le milliard d'années !

Qu'en est-il de la Terre ? Alors que la datation d'un échantillon de roche requiert des trésors de persévérance dans la première moitié du XXe siècle, celle de la planète entière reste encore un horizon inaccessible… Dans les années 1950, à Chicago (États-Unis), le chimiste Clair Patterson apporte enfin la solution tant attendue. En 1953, après avoir appliqué la méthode de datation uranium (père)-plomb (fils) à différents types de météorites glanées à la surface du globe, il constate que leurs âges concordent tous, autour de 4,5 milliards d'années. La même analyse, effectuée sur des sédiments de plaines abyssales océaniques, aboutit trois ans plus tard au même résultat : la Terre et les météorites sont nées au même moment et ont la même origine, lors de la formation du Système solaire — on dit qu'elles sont « contemporaines et cogénétiques ». Notre belle planète vient de prendre un sacré coup de vieux, confirmé depuis par toutes les études. ■

CENSURE

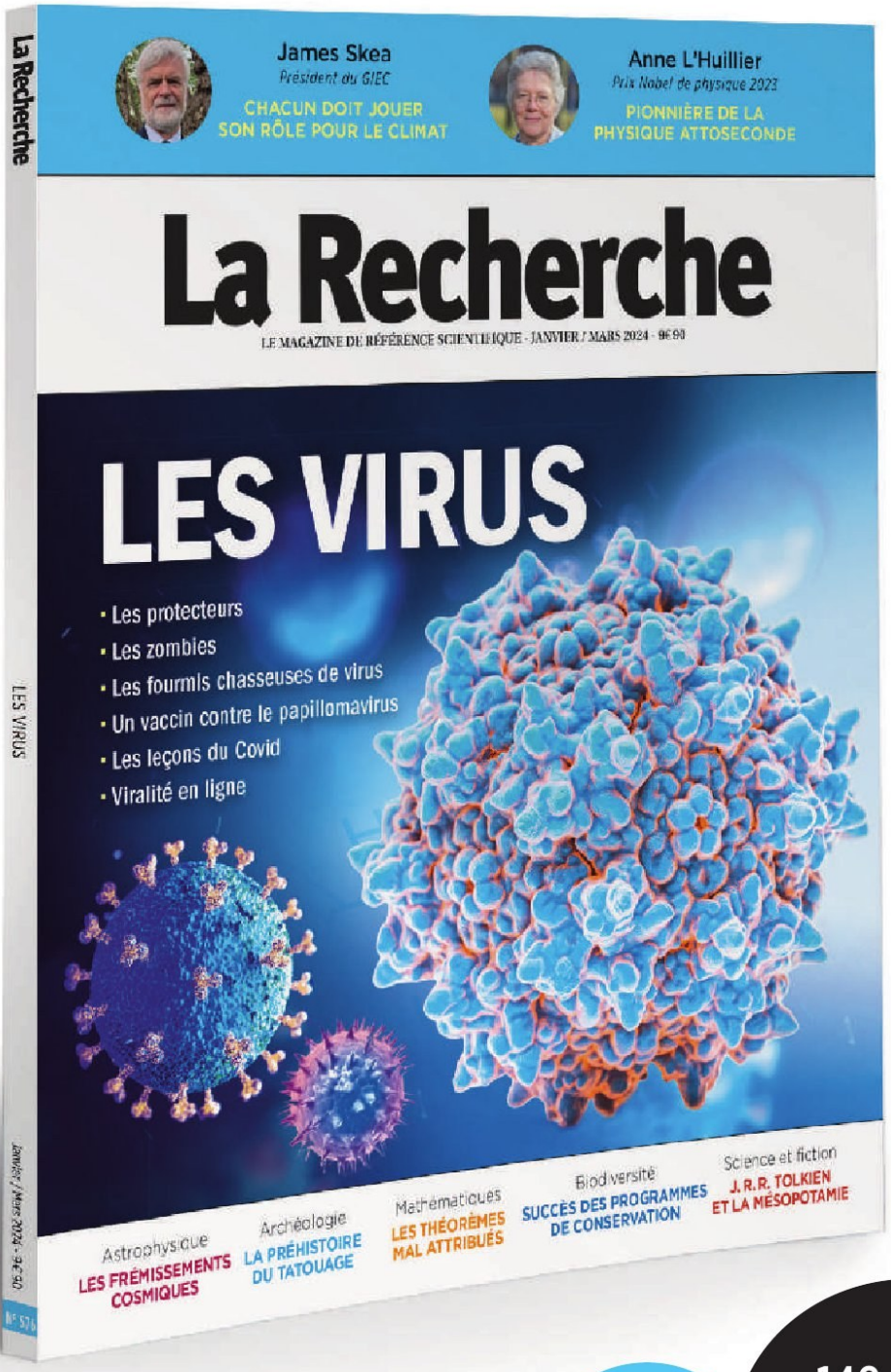
Les précautions de Buffon

Comme en témoignent le supplice et l'exécution du chevalier de La Barre à Abbeville (Somme) en 1766, après une condamnation pour profanation de crucifix, mieux valait encore éviter de s'en prendre trop ouvertement à la religion dans une France certes éclairée par les Lumières, mais toujours commandée par une monarchie « de droit divin ». Buffon le savait bien, qui a émaillé son *Histoire naturelle* de références à Dieu. La conclusion de ses « expériences sur le progrès de la chaleur dans les corps » résume ses précautions : *« Quoiqu'il soit très vrai que plus nous étendrons le temps et plus nous nous rapprocherons de la vérité et de la réalité de l'emploi qu'en fait la Nature, néanmoins il faut le raccourcir autant qu'il est possible pour se conformer à la puissance limitée de notre intelligence. »* D'un point de vue scientifique, un tel argument est bien sûr contestable ! Mais comment ne pas saluer la sincérité et la lucidité de Buffon ?

29 SCIENTIFIQUES
PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE



Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

SOMMAIRE
▶ C'est à lire p. 90
▶ C'est à voir p. 93
▶ Chroniques p. 94
▶ Questions de lecteurs p. 96
▶ Le ciel du mois p. 97
▶ Jeux p. 98

PAUL BECX/THE NETHERLANDS/SPL/SUCRE SALÉ

« Homo neanderthalensis » a su adapter son mode de vie et son alimentation en fonction de son environnement (vue d'artiste).

Neandertal dépoussiéré

Nourri des enseignements de deux siècles de fouilles, le paléontologue Marcel Otte trace le portrait de néandertaliens respectueux des équilibres naturels et dotés d'une pensée symbolique.

ADAPTATION Originaires des aires tropicales, diverses populations humaines se sont installées sur le continent européen il y a environ un million d'années. À partir d'environ -300 000 ans, leur uniformisation donna naissance aux néandertaliens. Ceux-ci ont ensuite occupé seuls l'Europe durant au moins 200 000 ans, un phénomène totalement inédit dans l'histoire humaine. Dans cet ouvrage nourri par les enseignements de deux siècles de fouilles intensives, le paléontologue belge Marcel Otte tente d'expliquer ce qui a permis cette grande stabilité à travers des climats et des environnements d'une forte diversité.

Quand la littérature populaire présente les néandertaliens comme une espèce antérieure, et donc inférieure à l'humain moderne par ses modes de vie, Marcel Otte montre que nos prédécesseurs européens avaient mis en place des pratiques respectueuses des équilibres naturels. Leur alimentation s'est au fil du temps adaptée aux variations climatiques : d'un régime probablement végétal à l'origine, ils se sont reportés sur la nourriture animale durant une période glaciaire rigoureuse. Dès lors, leur destin est devenu solidaire de celui des animaux consommés, qui ont acquis un statut de totem, tandis que les pratiques de chasse affermissaient les liens au sein du groupe. Les traces laissées montrent que les néandertaliens avaient développé une pensée symbolique, attribuant à des animaux comme l'ours une certaine sacralité. Cela explique peut-être pourquoi ils n'utilisaient pas d'ossements animaux pour fabriquer leurs outils.

Ils avaient également développé des rites funéraires variés, traduisant une véritable métaphysique de la vie. Les néandertaliens avaient ainsi élaboré des sociétés riches en spiritualité, d'une grande souplesse adaptative, qui ont été déstabilisées par l'arrivée de *sapiens*, pionnier venu d'ailleurs. ■ **Sylvie Rouat**

Les Néandertaliens. L'âge d'or de l'Europe, Marcel Otte, Odile Jacob, 176 p., 20,90 €

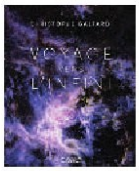
Voyages extraterrestres

DISCUSSIONS Directeur du centre britannique d'astrobiologie, l'auteur participe à des colloques à travers le monde. Et a souvent recours à des chauffeurs de taxi, qui l'interrogent sur sa profession, son domaine de recherche… et sur l'existence de possibles formes de vie extraterrestre. En rapportant 18 discussions, parfois farfelues, souvent pertinentes, l'astrobiologiste aborde une gamme d'interrogations scientifiques et philosophiques sur l'apparition et l'évolution d'une vie ailleurs que Terre. Un livre drôle et passionnant. **F. D.**

Un taxi pour l'espace. Conversations sur la vie dans l'Univers, Charles Cockell, Artaud, 336 p., 21 €

Odyssée cosmologique

GUIDE Dans cet ouvrage captivant, Christophe Galfard, ancien étudiant de Stephen Hawking, nous guide à travers l'immensité de l'Univers, de la Voie lactée jusqu'aux gigantesques superamas de plus de 100 000 galaxies. Enrichi par des photographies saisissantes prises par les télescopes Hubble et James-Webb, le livre offre une vision claire de phénomènes complexes, tels que l'usage de la spectroscopie pour analyser la composition des étoiles. Christophe Galfard aborde également la relativité générale d'Einstein de manière particulièrement accessible, une gageure ! **F. N.**

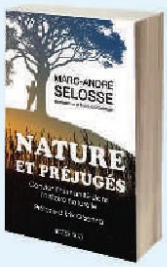


Voyage vers l'infini, Christophe Galfard, Michel Lafon, 248 p., 30,95 €

Cohabitation apaisée

REGARDS Vous avez la phobie des araignées, des serpents, des rats, des méduses, des requins ? Ce livre passionnant est fait pour vous. L'auteur se penche sur les nombreuses peurs liées à un animal, d'abord en s'interrogeant sur leur origine, qui peut remonter à de lointaines menaces comme celle des loups, ou, pour les requins, à la sortie d'un film comme *Les Dents de la mer* (Steven Spielberg). Il s'intéresse ensuite scientifiquement à ces merveilles d'adaptation, à leur rôle dans la nature. Surtout, il montre que leur pullulation ou leur disparition sont liées aux activités humaines. **S. R.**

Peurs bêtes, Nicolas Gilsoul, Fayard, 368 p., 22 €



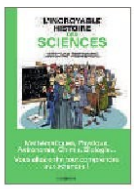
Mieux habiter le monde

COMPRÉHENSION Inspiré par les rencontres avec ses lecteurs, Marc-André Selosse, spécialiste des sols et des symbioses, s'attaque ici à un certain nombre d'idées reçues qui font obstacle à la compréhension du monde. Dans ce livre délicatement écrit et fort bien édité, où chaque essai est introduit par des sous-titres teintés d'humour, et conclu par une efficace synthèse, il prend un risque. Celui de brusquer ceux qui déclarent que *« la nature est bien faite »*, que *« l'entraide est une loi naturelle »*, ou qu'*« on peut douter des faits scientifiques »*. Son analyse, soutenue par la biologie et ancrée dans la théorie de l'évolution, emboîte le pas d'une pensée du vivant développée par des philosophes tels Bruno Latour ou Baptiste Morizot : nous évoluons au sein d'un réseau d'interactions, dans lequel il convient de supprimer la distinction entre nature et société et de freiner la compétition. Un nouveau savoir-vivre y surgira, à condition que l'on attribue une place importante à l'enseignement des sciences aux jeunes générations. ■ **Andreina De Bei**

Nature et Préjugés. Convier l'humanité dans l'histoire naturelle, Marc-André Selosse, Actes Sud, 448 p., 25 €

Café des sciences

BD *« On pourrait finalement raconter l'histoire de l'humanité à travers les progrès de la science… »*, suggère Marie à Cédric, attablé avec elle dans un café des sciences grouillant d'éminents chercheurs. Marie Curie joue le guide, Cédric Villani pose les questions, précise des détails dans cette BD réjouissante mêlant humour et érudition. L'audacieux voyage en sciences menant des origines à nos jours éclaire la physique, les mathématiques, la chimie et l'astronomie, dans un défilé de découvertes et de personnalités accessibles et familières. **A. De B.**



L'Incroyable Histoire des sciences, Didier Convard, Pierre Boisserie, Philippe Bercovici. Avec Cédric Villani, Les Arènes BD, 264 p., 25 €

Itinéraire d'une lanceuse d'alerte

RÉCIT En octobre 2021, le *Wall Street Journal* révèle le contenu de documents internes accablants de Facebook. Ils montrent que les équipes du réseau social savent parfaitement que leurs algorithmes favorisent la visibilité de contenus haineux, clivants, extrêmes, mais que, pour préserver le modèle économique. rien n'est fait pour y remédier. Ces documents ont été transmis au journal par une informaticienne qui raconte ici cette histoire. Frances Haugen retrace également sa formation dans une université expérimentale ou à la Harvard Business School, ses années chez Google et Yelp, avant son entrée chez Facebook. Autant d'étapes qui lui ont fourni les outils intellectuels (et techniques) pour voir ce qui n'allait pas chez Facebook et pour agir. On entre littéralement au cœur de la machine Google Books ou dans les données de Yelp, on voit fonctionner ces sociétés de technologie comme rarement cela a été raconté. Passionnant. ■ **Arnaud Devillard**

La Vérité sur Facebook, Frances Haugen, Fayard, 380 p., 25 €

Rendre inclusives les mathématiques

ENQUÊTE Les mathématiques sont la discipline la moins féminisée, malgré des tentatives pour enrayer ce déséquilibre ancien. L'ouvrage est une enquête sociologique auprès de 45 adolescentes participant à un stage de maths à Marseille. Présentée sous forme d'illustrations et accompagnée de jolis problèmes de mathématiques, l'enquête est révélatrice d'une situation où le sexisme prévaut. À faire lire à toutes les jeunes filles — et aux jeunes gens — pour mieux comprendre la situation et les obstacles ancrés en nous. **Ph. P.**

Matheuses, C. Perronnet, C. Marc et O. Paris-Romaskevich, CNRS Éditions, 240 p., 24 €

Les Aztèques par eux-mêmes

CIVILISATION La grande originalité de ce livre, c'est qu'il conte l'histoire des Mexicas (l'autre nom des Aztèques) avant, pendant et après la conquête espagnole, en s'appuyant presque exclusivement sur les sources écrites autochtones et non pas, comme jusqu'à présent, sur les témoignages des conquistadors espagnols ou des textes influencés par l'Espagne (*codex de Florence, codex Mendoza*). Cela a été rendu possible par la profonde connaissance du nahuatl (la langue aztèque) de l'auteure. Il en ressort un livre agréable à lire, abordable et très documenté, qui retrace l'histoire de cette civilisation depuis son installation dans le bassin central du Mexique au XIIIe siècle. Battant en brèche un certain nombre de mythes instillés par les récits des Espagnols sur la société mexica (l'organisation du pouvoir, la place des sacrifices humains…), il redonne de la perspective à notre perception de cette civilisation aussi fascinante que complexe. ■ **V. G.**

Le Cinquième Soleil. Une autre histoire des Aztèques, Camilla Townsend, Albin Michel, 416 p., 26,90 €

Les fonctions de la folie

COMPROMIS Dans un monde plein de dangers, l'anxiété favorise la survie. Des symptômes dépressifs peuvent signaler le besoin d'aide et les comportements impulsifs être source d'audace. Dans cet essai, le psychiatre Patrick Lemoine explore les compromis évolutifs à l'origine de certains troubles psychologiques, parfois utiles, tant qu'ils ne deviennent pas toxiques. Il s'inscrit ainsi dans la perspective de la médecine évolutionniste. Avec l'espoir de réorienter les troubles pathologiques vers leur fonction première. **H. J.**

À quoi servent les symptômes ?, Patrick Lemoine, Odile Jacob, 240 p., 11,90 €

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

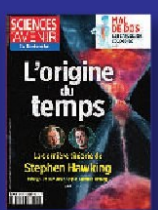
❑ N° 916 ❑ N° 917/918 ❑ N° 919 ❑ N° 920
❑ N° 921 ❑ N° 922 ❑ N° 923 ❑ N° 924

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

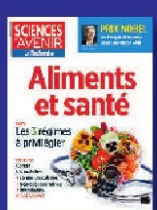
N° 916 James-Webb : une nouvelle histoire de l'Univers

N° 917/918 Spécial Eau

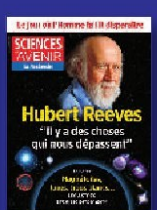
N° 919 Découvertes sur Alzheimer et Parkinson



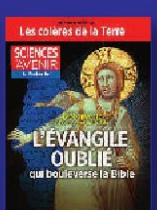
N° 920 L'origine du temps



N° 921 Aliments et santé



N° 922 Hommage à Hubert Reeves



N° 923 L'évangile oublié qui bouleverse la Bible

N° 924 Dépression : les nouvelles pistes pour s'en sortir

EXPOSITIONS

Bordeaux (33)

Illustrations, entre sciences et arts
Deux lieux présentent des illustrations naturalistes en zoologie, paléontologie, minéralogie, botanique… Objets d'art comme de science, les planches sont reproduites en grand format.
Muséum et Jardin botanique, 5, place Bardineau, jusqu'au 30 juin. Rens. : 05.24.57.65.30.

Lille (59)

Mémoires et métamorphoses
Des photographies révèlent les transformations dont le musée a fait l'objet au fil du temps et les diverses configurations qu'il a eues.
Musée d'histoire naturelle, 23, rue Gosselet, jusqu'au 1er avril. Rens. : 03.28.55.30.80.

Marseille (13)

Populaire ? Les trésors des collections du Mucem
Pour ses dix ans, le musée ouvre un parcours permanent dédié à ses collections. Les fonds historiques du Musée national des arts et traditions populaires côtoient ceux du musée de l'Homme.
Mucem, esplanade du J4. Rens. : 04.84.35.13.13.

Nissan-Lez-Enserune (34)

En route ! La voie domitienne, des Pyrénées au Rhône
Tracé, usages, nécropoles, tout ce que l'on connaît de la plus ancienne structure romaine du Midi méditerranéen est ici présenté.
Oppidum et musée archéologique, site archéologique, jusqu'au 19 mai. Rens. : 04.67.32.60.35.

Paris (75)

L'aventure des inventions
Tous les jeudis après-midi, un expert (mathématique, physique, chimie, mécanique, informatique…) intervient sur un objet exposé dans le parcours permanent du musée. Un prétexte à remonter le fil d'une histoire scientifique.
Musée des Arts et Métiers, amphi Abbé-Grégoire, 292, rue Saint-Martin, jusqu'au 6 juin. Rens. : 01.53.01.82.75.

Rueil-Malmaison (92)

Léonard de Vinci, les inventions d'un génie
Cette exposition, déjà dévoilée dans plusieurs grandes villes européennes, présente une centaine de machines construites d'après les dessins du maître florentin. Engin de levage, machine-outil, objets de mesure ou système hydraulique peuvent même être manipulés.
Atelier Grognard, 6, avenue du Château-de-Malmaison, jusqu'au 12 mai. Rens. : 01.47.14.11.63.

Paris (75) / Exposition

Demain est annulé

C'est une COP sur le changement climatique comme on n'en a jamais vu. Des hommes d'affaires en costume cravate dont on ne distingue que des bras, des jambes, l'arrière d'une tête, sont en train de se faire engloutir par le gravier d'un jardin zen. Ces personnages sont les mannequins d'une installation ouvrant cette exposition consacrée à la sobriété et aux « limites de notre environnement ». La surconsommation, l'accumulation de biens ou la dégradation de milieux naturels inspirent une trentaine d'œuvres. Des photographies montrent des glaciers alpins recouverts de bâches censées enrayer leur fonte. Mais, pris au Polaroïd et vus en négatif, ces paysages semblent déjà appartenir au passé. À l'entrée, une grande mosaïque colorée réalisée par le Zimbabwéen Moffat Takadiwa impressionne. « *Il faut vraiment s'approcher pour s'apercevoir qu'il s'agit de déchets* », note Dominique Bourg, un des commissaires scientifiques. À l'inverse, une tapisserie faite de fibres naturelles, de fils conducteurs et de LED suggère la possibilité d'un certain équilibre. ■

LEANDRO ERLICH STUDIO

« Pulled by the roots » (tiré par les racines), photographie de Leandro Erlich (2015).

Arnaud Devillard

Fondation groupe EDF, 6, rue Récamier, jusqu'au 29 septembre. Rens. : 01.40.42.35.35.

Saint-Étienne (42)

Cancers
L'exposition de la Cité des sciences et de l'industrie à Paris reprend dans la ville qui a mis en place un plan Cancer l'an dernier. La visite se fait par pôles thématiques (recherche, traitements, perception de la maladie…).
Lire notre reportage de 2022 : sciav.fr/cancer911
Cité du design, 3, rue Javelin-Pagnon, jusqu'au 13 juillet. Rens. : 04.77.49.74.70.

Toulouse (31)

IA : double Je. L'intelligence artificielle et moi
Où l'IA va-t-elle nous mener ? Cette exposition fait le point sur les recherches et usages en place. Elle explore aussi les futurs possibles.
Quai des Savoirs, allée Matilda, jusqu'au 3 novembre. Rens. : 05.67.73.84.84.

PARTENARIAT

Drancy (93)

Latitudes animales
Cet événement photographique bisannuel témoigne de la richesse et de la beauté de la biodiversité animale… et de sa fragilité. Des prises de vue aussi artistiques que propices à la prise de conscience.
Parc et Château de Ladoucette, jusqu'au 24 mars. Rens. : 01.48.96.50.87.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 3.

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec, groupe 1.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CÉLINE GUIVARCH ET CHRISTOPHE CASSOU

De possibles points de bascule dès aujourd'hui !

Imaginez une tour du jeu Jenga. Vous retirez les blocs un à un, la tour devient instable mais résiste… jusqu'à ce que vous enleviez le bloc de trop et qu'elle s'effondre en une fraction de seconde. De manière similaire, notre système terrestre comporte des points de bascule, des seuils critiques au-delà desquels des changements majeurs, parfois irréversibles et aux conséquences immenses, peuvent survenir rapidement. Par exemple, l'Amazonie fournit une grande partie de ses propres précipitations par échange d'eau entre l'atmosphère locale et la végétation. La déforestation et les sécheresses de plus en plus récurrentes dues au changement climatique peuvent perturber ce mécanisme, poussant le système à franchir un point de bascule où la forêt se transforme en savane. Ce dépérissement de l'Amazonie serait une catastrophe pour la biodiversité, les populations du bassin amazonien et la planète entière au climat global alors modifié. L'effondrement des calottes glaciaires ou la libération de carbone due à la fonte du pergélisol seraient aussi des points de bascule amplifiant considérablement la hausse du niveau de la mer et l'amplitude du réchauffement. L'état des connaissances scientifiques ne permet pas de chiffrer précisément les seuils de basculement, mais donne des fourchettes de réchauffement global dans lesquelles ils risquent de se déclencher. À +1,1 °C aujourd'hui par rapport aux températures préindustrielles, nous entrons déjà dans le monde possible de certains points de bascule et leur risque de déclenchement augmente nettement avec chaque fraction de degré supplémentaire. La meilleure prévention est de limiter le réchauffement au niveau le plus bas possible. ■

Directrice de l'institut Henri-Poincaré, à Paris.

CAMILLE CIER / HANS LUCAS

MATHS PAR SYLVIE BENZONI-GAVAGE

Au-delà de la science des chiffres

Compter fait partie des premières compétences acquises par les humains au cours de leur éducation. Avec la reconnaissance de formes, c'est leur premier contact avec les maths. L'omniprésence des chiffres se poursuit tout au long de la scolarité, de sorte que les mathématiques sont souvent qualifiées de « science des chiffres ». Une appellation réductrice et trompeuse. Certes, les nombres jouent un rôle important. La communauté mathématique les aime au point de s'amuser avec la numérologie des dates, que ce soit pour souhaiter une bonne année « tétraédrique » (2024) ou pour faire du 14 mars (3-14 en notation états-unienne) le « jour de pi », une journée internationale de célébration des maths. Les fractions surgissent de toute part dans cette science, naturellement en combinatoire et théorie des probabilités, mais aussi dans des raffinements de domaines comme l'algèbre, l'analyse, la modélisation. Cependant, la théorie des nombres occupe une place limitée : une station sur la ligne « arithmétique » de la carte de métro de la Maison Poincaré, le musée des maths qui vient d'ouvrir à Paris *(lire p. 40)*. Ce sont ses interactions avec d'autres domaines comme l'algèbre, l'analyse et de nombreux pans de la géométrie qui rendent la théorie des nombres si importante. C'est pourquoi les maths sont bien plus que la science des chiffres. Et l'on peut devenir mathématicienne sans connaître ses tables de multiplication ! ■

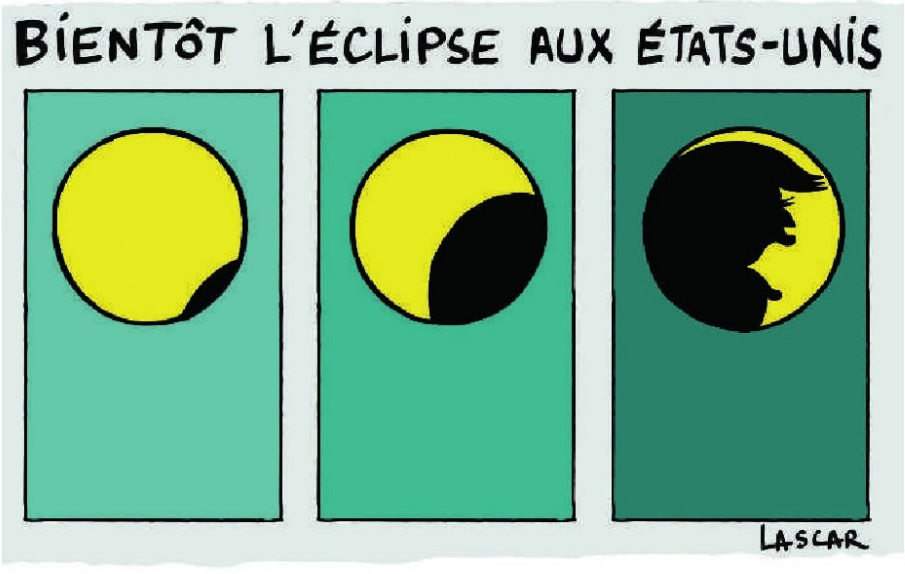
ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Attribuer le prix Nobel à une IA qui aurait fait de grandes découvertes ?

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

BRUNO LÉVY

En 1972, Nicholas Negroponte, un tout jeune professeur d'architecture au MIT, aux États-Unis (il avait à peine 29 ans) qui se passionnait pour l'utilisation de l'intelligence artificielle, fit un canular : il envoya à des personnalités politiques, à des journalistes et à des prix Nobel une lettre pour leur demander ce qu'ils pensaient de l'attribution du prix Nobel à une machine qui aurait fait de grandes découvertes. À l'époque, bien peu répondirent à cette question vue comme fantaisiste et quelque peu saugrenue. Cinquante ans plus tard, en 2022, la foire annuelle du Colorado (États-Unis) décerna le premier prix de son concours des beaux-arts à un tableau au titre français, *Théâtre d'opéra spatial*, réalisé au moyen du programme Midjourney qui recourt à des techniques d'intelligence artificielle. Dès lors, la question posée il y a un peu plus d'un demi-siècle par Nicholas Negroponte devient brûlante : pourquoi ne donnerait-on pas le prix Nobel ou la médaille Fields à un programme d'intelligence artificielle qui aurait grandement contribué à l'avancement des sciences ou effectué une œuvre remarquable, par exemple écrit un cycle romanesque ? Certains rétorqueront que la médaille Fields récompense un mathématicien de moins de 40 ans et qu'il est difficile d'évaluer l'âge d'une machine, encore que cela puisse faire débat. Quant au prix Nobel, on l'attribue à des personnes ayant apporté le plus grand bénéfice à l'humanité, par leurs inventions, leurs œuvres ou leurs travaux en faveur de la paix. D'aucuns dénieront le statut de personne aux machines. Toutefois, l'utilisation répandue de l'article indéfini dans l'expression « des IA » suscite le doute. Et, si l'on accepte l'idée de décerner le prix Nobel à une machine, pourquoi ne la distinguerait-on pas de la Légion d'honneur si elle avait rendu des services éminents à la nation, par exemple si elle avait contribué à déjouer des attentats terroristes ? Et, dans cette éventualité, ne faudrait-il pas aussi envisager de la lui retirer au cas où elle se montrerait indigne ? Mais, là, peut-être serait-il trop tard… ■



L'ŒIL DE LASCAR

Aux États-Unis, 2024 est une année électorale. Et astronomique ! Le 8 avril, une éclipse de Soleil sera visible chez l'oncle Sam, après avoir traversé le Mexique et avant de passer au-dessus du Canada. Sa durée maximale sera d'environ 4 minutes et 28 secondes. Hors de la zone d'éclipse totale, noyée d'obscurité, c'est à une éclipse partielle que pourront assister presque tous les habitants d'Amérique du Nord. Les yeux couverts, bien sûr, des fameuses lunettes de protection. **O. L.**

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

ÉTHOLOGIE

Pourquoi les chats aiment-ils les cartons ?

Jack K.

Les chats sont des amateurs inconditionnels des boîtes, notamment en carton. Trois vétérinaires de l'université d'Utrecht (Pays-Bas), dans une étude de 2014, ont établi trois raisons : d'abord, la recherche d'un espace confiné. Dans la nature, il permet au chat de se cacher des prédateurs et d'accroître ainsi ses chances de survie, mais aussi de tendre une embuscade à une proie. Ensuite, la boîte en carton retient la chaleur, la température de confort du chat se situant entre 30 et 36 °C. Enfin, en cas de changement d'environnement, le félin est moins stressé dans un lieu confiné, et ainsi plus prompt à interagir avec les humains. ■ **Lise Loumé**

PSYCHOLOGIE

Quelle différence entre éco-anxiété et solastalgie ?

Yousf B.

Le mot éco-anxiété a été forgé en 1997 par Véronique Lapaige, chercheuse belgo-canadienne qui a observé qu'un nombre croissant de personnes développaient une inquiétude face au changement climatique et aux catastrophes écologiques annoncées. Il s'agit donc d'une anxiété par anticipation. Quant à la solastalgie, un néologisme utilisé dès 2003 par le philosophe australien Glenn Albrecht, elle traduit une détresse psychologique face à ce qui est déjà perdu, à la suite d'une altération de l'environnement. L'éco-anxiété et la solastalgie peuvent donc être ressenties en même temps. ■ **Isabelle Do O'Gomes**

ESA HILTULA/ALAMY/PHOTOI2

Lorsque le pied heurte la surface, la Maïzena mêlée à l'eau se solidifie.

CHIMIE

Pourquoi marcher sur l'eau est-il possible avec de la Maïzena ?

Cyril H.

Expérience de chimie divertissante : versez de la Maïzena dans un bol et ajoutez de l'eau tiède jusqu'à obtenir un mélange fluide et homogène. Maintenant, amusez-vous : si vous enfoncez un doigt doucement dans la préparation, il y pénètre facilement. En revanche, si vous tapez dessus violemment, l'eau et la Maïzena opposent une résistance étonnante. Cette propriété de certains fluides à devenir solides en fonction des forces qu'on y applique fascine les chercheurs depuis longtemps. En 2017, une équipe dirigée par Yoël Forterre de l'université d'Aix-Marseille a fourni une explication à ce phénomène : tout dépendrait du frottement entre les particules et de forces répulsives à courte portée. Ainsi, en conditions normales, les grains de Maïzena restent à distance les uns des autres : la suspension coule comme un liquide. Mais sous l'effet d'un choc, ces grains se rapprochent et frottent les uns contre les autres, transformant alors la suspension en solide. « *En microscopie électronique, rien ne distingue un grain de Maïzena d'un grain de semoule ou de sable, si ce n'est sa petite taille* [15 micromètres] », explique Yoël Forterre. Et cela change tout : les forces répulsives semblent ainsi d'autant plus fortes que les particules sont petites. « *À cette échelle, la force répulsive est assez forte pour maintenir les grains à distance et éviter les contacts* », ajoute le chercheur. Ainsi, on peut vraiment « marcher sur l'eau » dans une piscine remplie d'un mélange d'eau et de Maïzena, à condition de ne pas s'arrêter sinon… on coule. ■ **Hervé Ratel**

PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

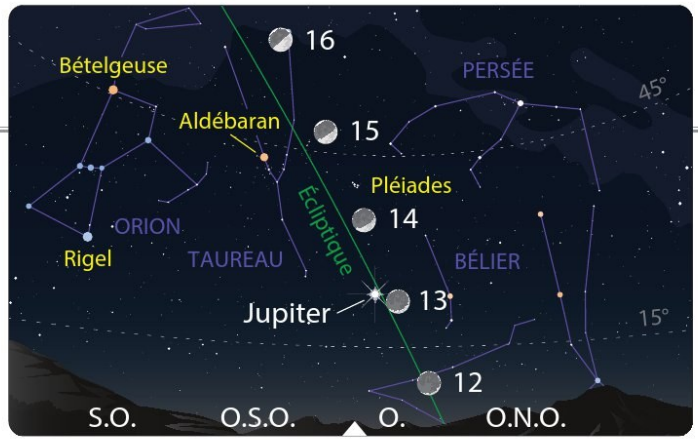
MERCURE La petite planète atteint sa plus grande distance angulaire (près de 19°) à l'est du Soleil le 24. Elle est facilement visible en soirée ce mois mais sa luminosité décroît au fil des jours.

VÉNUS L'étoile du Berger n'est plus observable que marginalement le matin, très bas dans la direction du Soleil levant.

MARS La planète Rouge n'est pas dans de bonnes conditions d'observation sous nos latitudes. Très basse vers le levant, peu brillante, elle peut quasiment être ignorée jusqu'à l'été.

JUPITER La plus grande des planètes est visible en soirée vers l'ouest, alors qu'elle a déjà bien entamé sa descente vers l'horizon. Objet ponctuel le plus brillant du ciel, elle se couche avant minuit. Le 1er, une heure après le coucher du Soleil, on la trouve encore à une quarantaine de degrés de hauteur. Trente jours plus tard, elle sera deux fois plus basse au même instant.

SATURNE La planète aux anneaux est passée en conjonction avec le Soleil à la fin février et n'émerge que très timidement des lueurs du levant. Ce mois, elle partage avec Mars de mauvaises conditions d'observation.



La scène est représentée du 12 au 16, deux heures après le coucher du Soleil. Nous sommes tournés vers le couchant.

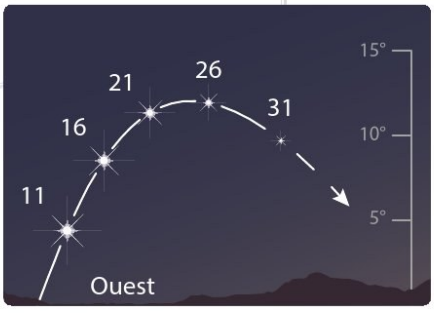
La Lune, notre guide céleste

LE MOUVEMENT DE LA LUNE AUTOUR DE LA TERRE lui fait traverser les constellations du zodiaque en 27 jours environ. Ainsi, du 12 au 16, nous la verrons successivement dans la terne constellation des Poissons, près de Jupiter dans le Bélier, non loin de l'amas des Pléiades et d'Aldébaran dans le Taureau, toujours plus haute et plus brillante.

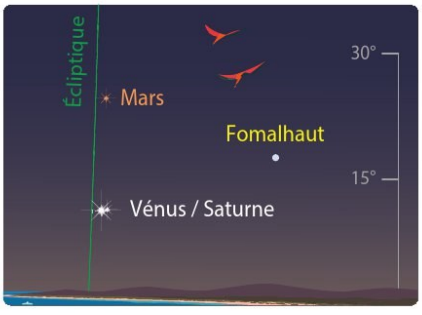
Notre conseil L'observation est aisée sauf le 12 où il convient d'avoir un horizon ouest bien dégagé. Notez combien la Lune constitue une véritable source de pollution lumineuse lorsque sa phase augmente !

L'appli du mois

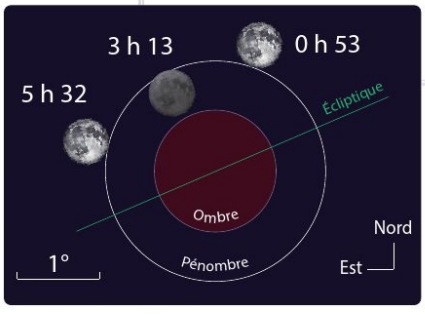
ASTRO-COLIBRI est une application gratuite en anglais pour Android et iOS. Elle permet à chacun, qu'il soit astronome amateur ou professionnel, d'obtenir en temps réel des informations sur les phénomènes les plus extrêmes (sursauts gamma, ondes gravitationnelles…), de les identifier et, éventuellement, de les observer rapidement.



EN MARS, MERCURE FAIT UNE BELLE APPARITION dans le ciel du soir car elle bénéficie d'un écliptique bien relevé sur l'horizon. Il est ici 30 minutes après le coucher du Soleil.



LE MATIN DU 22, SUR L'ÎLE DE LA RÉUNION, Vénus et Saturne se donnent rendez-vous vers le levant pour un rapprochement à admirer à l'œil nu, aux jumelles et au télescope.



DANS LA NUIT DU 24 AU 25, UNE ÉCLIPSE DE LUNE par la pénombre sera visible dans son intégralité en Martinique et en Guadeloupe. Le maximum prendra place à 3h13 min locales.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de mars

PAR PIERRE BERLOQUIN

SOLUTIONS DANS LE PROCHAIN NUMÉRO

▶ Chiffres en grille

En utilisant au plus une fois chaque chiffre, trouvez le total 36 en additionnant des chiffres qui se touchent horizontalement, verticalement et en diagonale.

3	8	9
5	1	6
4	2	7

▶ Authentique néant

Remplacez chaque lettre par un même chiffre pour que l'addition soit exacte.

```
  Z E R O
+ Z E R O
---------
= N E A N T
```

▶ Des mots rougissent

Dans cette phrase de Claude Lévi-Strauss, certains mots sont rouges selon une certaine logique. Trouvez cette logique.

Le savant n'est pas l'homme qui fournit les vraies réponses ; c'est celui qui pose les vraies questions.

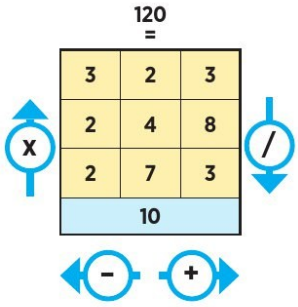
▶ Auto références

Cases roses : les grands chiffres y indiquent le nombre d'occurrences de chacun des petits chiffres dans l'ensemble de la grille, cases roses et blanches. Complétez cette grille de manière cohérente.

1 **3**	6 **1**	1		8
2	7 **3**	0	2	4
3	8 **2**		7	2
4 **4**	9	7	2	4
5 **1**	0 **2**	4	6	

▶ Labyrinth-métique

En partant du nombre du bas, obtenez celui du haut selon les règles suivantes :



- Quand on monte d'une case, on multiplie par le nombre du haut.
- Quand on descend, on divise par le nombre du bas.
- Quand on va à droite, on additionne au nombre de droite.
- Quand on va vers la gauche, on soustrait le nombre de gauche.
- On ne passe pas plus de deux fois sur la même case.
- Le résultat est obtenu sur l'une des trois cases du haut.
- Les résultats partiels ne sont pas forcément des nombres entiers.

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 924, février 2024

▶ De la France à l'Écosse

F	R	A	N	C	E
R	A	N	C	E	S
C	O	R	N	E	S
C	O	R	S	E	S
E	C	O	S	S	E

▶ Carré géodésique

7	9	5	4	6	1	8	2	3
1	2	9	5	4	8	6	3	7
2	4	6	8	1	3	7	5	9
9	6	8	1	7	2	3	4	5
6	7	3	2	9	4	5	1	8
4	1	7	3	2	5	9	8	6
5	8	1	7	3	9	2	6	4
8	3	2	9	5	6	4	7	1
3	5	4	6	8	7	1	9	2

▶ Multiplication pour lettrés

CINQ ▶ 6315
SX ▶ 08
BL ▶ 29

6315 x 038 = 239970

▶ 20 dans l'ordre !

(1 + 2/3) x (-4 + 5) x (6 + 7 + 8 - 9) = 20

soit : cinq tiers de douze.

▶ À cloche-lettre

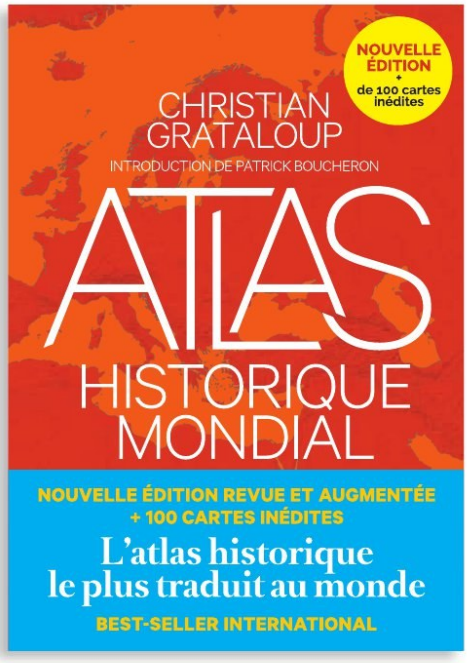
LICORNE de 3 en 3, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

VOUS PROPOSE :

L'Atlas historique mondial 2023



La priorité donnée aux cartes

Chaque carte est présentée en double page ou en pleine page avec de nombreux zooms permettant de donner la part belle à l'image.

Texte d'accompagnement

Chaque carte est complétée par un court texte de contextualisation historique.

600 cartes

AU PRIX DE 35€ seulement

Le ⊕ de l'Atlas

Toutes les cartes sont téléchargeables gratuitement au format PDF.
Un outil pédagogique indispensable, du collège à l'université.

Chronologie historique

De nombreuses cartes seront accompagnées d'une chronologie réalisée par les historiens de la revue L'Histoire.

L'Atlas historique mondial est un nouveau récit cartographique de l'histoire du monde dans lequel chacune des 600 cartes est une mise en perspective de l'histoire globale. Au travers de cartes inédites conçues par L'Histoire et Légendes Cartographie, complétées de textes explicatifs, vous saisirez rapidement les moments marquants de l'histoire de l'humanité.

Fruit de l'association des Arènes et de la revue L'Histoire et sa communauté d'historiens, cet atlas sans équivalent est à la fois un ouvrage géographique et un livre d'histoire du monde et des mondes.

Commandez-le dès aujourd'hui, renvoyez le coupon ci-dessous, ou par Internet sur le site : www.sophia-boutique.com ou par téléphone au 01 55 56 70 54 (en précisant le code : SCA923)

(Délai de réception : 2 semaines environ)

BON DE COMMANDE

À compléter et à renvoyer avec votre règlement sous enveloppe affranchie à : SOPHIA BOUTIQUE - 45, avenue du Général Leclerc - 60643 Chantilly Cedex

☐ **OUI,** je commande un **Atlas historique mondial édition 2023 (réf V200)** au prix de **35€ + 1€** de frais d'envoi, soit au total **36€**

SCA923

ADRESSE DE LIVRAISON

☐ M. ☐ Mme ☐ Mlle

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal :

Ville :

Téléphone :

E-mail : @

Pour la bonne gestion de votre commande, merci d'indiquer votre e-mail.

☐ J'accepte de recevoir des offres par email des partenaires de Sophia Boutique

MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Je règle par chèque à l'ordre de : **Sophia Boutique**

☐ Je règle par carte bancaire

N°

Expirant le

Signature obligatoire

*Offre réservée en France Métropolitaine. Les Éditions Croque Futur situées au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e, et qui éditent Sophia Boutique sont responsables de traitement et collectent des données afin de servir votre commande. Vos données pourront être transmises à d'autres organismes (presse, VAD, caritatif) et sont conservées pour une durée de 3 ans à partir de votre dernière commande. Vous pouvez exercer vos droits d'accès, de rectification, de limitation, de portabilité, d'opposition, d'effacement au traitement de vos données et définir vos directives post-mortem à l'adresse mail suivante : dpo@sophiaboutique.fr en joignant une copie de votre carte d'identité. Les Éditions Croque Futur disposent d'un délégué à la protection des données pouvant être contacté au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e ou à l'adresse mail dpo@sophiaboutique.fr. À tout moment vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL.

nouveau

CRÉATION ÉPHÉMÈRE N°5

Un trésor gustatif rare issu de grains Arabica Bourbon du Rwanda

L'OR SANS DOUTE LE MEILLEUR CAFÉ DU MONDE

JACOBS DOUWE EGBERTS FR SAS | 30 BIS, RUE DE PARADIS, 75010 PARIS, FRANCE, 810 029 413 RCS PARIS | SAS AU CAPITAL DE 16 594 157,70 EU ROS.